

# fizikai szemle

A black and white photograph of a satellite in space. The satellite's large solar panel arrays are the primary focus, showing a grid-like structure of solar cells. The Earth's surface is visible in the background, showing cloud patterns. The text 'fizikai szemle' is overlaid in the top left, and '2006/9' is in the bottom left.

2006/9

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Oktatási Minisztérium,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság  
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

Beke Dezső, Bencze Gyula,  
Czitrovsky Aladár, Faigel Gyula,  
Gyulai József, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,  
Sükösd Csaba, Szabados László,  
Szabó Gábor, Tóth Kálmán,  
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

[szerkesztok@fizikaiszemle.hu](mailto:szerkesztok@fizikaiszemle.hu)

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

A tizenhat ország közös vállalkozásaként  
működő Nemzetközi Űrállomás  
fedélzetéről készített fénykép.  
Előtérben az űrállomás energiaellátását  
biztosító napelempanellek, mögöttük  
az eddig észlelt legerősebb,  
Iván nevű hurrikán „szeme”.  
(Fotó: NASA, 2004. szeptember 11.)

## TARTALOM

<i>Ungár Tamás</i> : Diszlokációk segítik a földkéreg mozgását	289
<i>Nemcsics Ákos</i> : Vékonyrétegekről, nanostruktúrákról a napelem ürügyén	293
<i>Andrási Andor</i> : Belső sugárterhelés meghatározása egésztestszámlálással	299
<i>Iglói Ferenc</i> : Száz éve halt meg Ludwig Eduard Boltzmann, a statisztikus fizika megalapozója	305
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
<i>Vankó Péter</i> : Izgalmas mérések a mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumban	307
<i>Sebestyén Klára, Simon Péter, Vibartné Balogh Éva</i> : Fizikatanárnak lenni jó	313
<b>PÁLYÁZATOK</b>	317
<b>KÖNYVESPOLC</b>	317
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	318
Melléklet: Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Ügyrendje	
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
Fizikus szemmel a szivárványról ( <i>Cserti József</i> )	320

*T. Ungár*: Dislocation creep as a condition of the movement of the Earth's mantle

*A. Nemcsics*: Thin layers, nanostructures, and solar cells

*A. Andrási*: Inner radiation load determination based on whole-body counting

*F. Iglói*: Ludwig Eduard Boltzmann centenary

### TEACHING PHYSICS

*P. Vankó*: Exciting measuring tasks in an engineering-physicist students' laboratory

*K. Sebestyén, P. Simon, E. Vibart-Balogh*: Hungarian physics teachers' visit in the CERN

### TENDERS, BOOKS, EVENTS

### SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL

The rainbow as seen by a physicist (*J. Cserti*)

*T. Ungár*: Fehlstellen-Wanderung ermöglicht Bewegungen in der Erdkruste

*A. Nemcsics*: Dünne Schichten, Nanostrukturen und Sonnenelemente

*A. Andrási*: Bestimmung der inneren Strahlungsbelastung aufgrund  
von Ganzkörper-Zählungen

*F. Iglói*: Ludwig Eduard Boltzmann – zum hundertsten Todestag

### PHYSIKUNTERRICHT

*P. Vankó*: Spannende Messaufgaben im Labor der Ingenieur-Physiker-Studenten

*K. Sebestyén, P. Simon, E. Vibart-Balogh*: Besuch ungarischer Physiklehrer im CERN

### AUSSCHREIBUNGEN, BÜCHER, EREIGNISSE

### WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE

Was hat ein Physiker am Regenbogen zu erklären? (*J. Cserti*)

*T. Унгар*: Передвижение дислокаций – основа движений коры Земли

*A. Немчиш*: Тонкие пленки, наноструктуры и солнечные батареи

*A. Андраши*: Определение внутренней радиационной нагрузки на основе  
внешних измерений

*Ф. Иглои*: Сто лет со дня кончины Л. Больцмана

### ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ

*П. Ванко*: Интересные измерения в вузовской лаборатории будущих  
инженеров-физиков

*К. Себештьен, П. Шимон, Е. Вихарт-Балог*: Визит венгерских учителей  
физики в институт CERN

### ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ

### НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ

Радуги – глазами физика (*Й. Чертю*)

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította  
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LVI. évfolyam

9. szám

2006. szeptember

## DISZLOKÁCIÓK SEGÍTIK A FÖLDKÉREG MOZGÁSÁT

Ungár Tamás

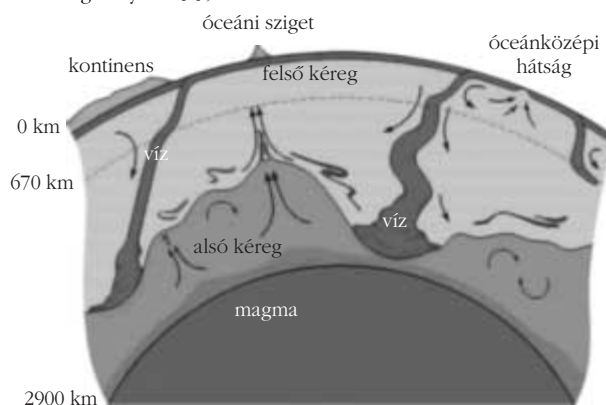
ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék

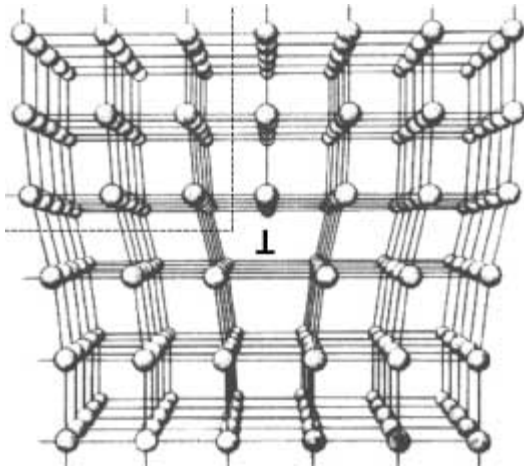
Földünk szilárd kérge a mai napig állandó mozgásban van. Ennek vagyunk nap mint nap szemtanúi, amikor egy-egy földrengésről vagy szökőárról kapunk tudósítást. A kövekről, sziklákról vagy a földkéreg lemezeiről azt gondolnánk, hogy azok rideg, képlékenyen aligha alakítható, kerámiaszerű anyagok. Csak amikor magas hegyvidéken, vagy annak közelében járunk, látjuk gyakran – némiképpen csodálkozva –, hogy a csupasz sziklafalak különösen görbült, lágyan, vagy akár élesebben meghajlított sziklalemezek keresztmetszetét mutatják. A kövek és sziklák ugyanúgy képlékenyen alakíthatók, mint az acél vagy alumínium, csak ehhez nem elegendő néhány másodperc vagy perc, hanem évmilliókra vagy évmilliárdokra van szükség. Dehát a hegyek nem sietnek. A földkéreg mozgásáról igen szemléletes pillanatképeket mutat az 1. ábra, amely Földünk keresztmetszetének sematikus képét adja [1]. Látjuk, hogy a víz akár több ezer km mélységig behatolhat a Föld mélyébe. A lefelé vagy fölfelé irányított görbült nyilak pedig a különböző irányba mozgó földkéregdarabok mozgásirányait jelképezik. A leszakadó és mélyebbre kerülő, illetve az ezekkel helyet cserélő, mintegy „felúszó” kéregdarabok mozgásuk során jelentős képlékeny alakváltozást szenvednek, hiszen gigantikus méretű kőzetdarabok cserélnek ilyenkor helyet. A földfelszínen, vagy annak közelében található kőzetek képlékeny alakváltozási mechanizmusait valódi geológiai mintákon vizsgálhatjuk, illetve követhetjük nyomon. Azonban a mélyebben fekvő kőzetek esetében kénytelenek vagyunk megelégedni szintetikus elállított kőzetminták tanulmányozásával. Mára a geológusok, hála a különféle hullámterjedési módok igen pontos ismeretének, pontosan feltérképezték mind a felső, mintegy 800 km vastag, mind az alsó, mintegy 2900 km mélységig terjedő földkéreg kémiai összetételét, valamint azt,

hogy az egyes kőzettípusok hogyan helyezkednek el. A felső földkéreg kőzeteinek fő összetevő elemei gyakorlatilag csak a magnézium, vas, alumínium, szilícium, kalcium és oxigén. A mélység változásakor, bár a nyomás növekedésével más és más kristályszerkezetben – ezek leggyakrabban a kvarc különböző módosulatai –, szinte ugyanazokat az elemeket találjuk.

A kéregdarabok mozgásának leírása és megértése érdekében először arra az alapkérdésre kell válaszolnunk, hogy milyen mechanizmusok vezérlik a képlékeny alakváltozást. Ezekhez a vizsgálatokhoz csak laboratóriumi körülmények között, szintetikus elállított anyagminták állnak rendelkezésre, hiszen 100 vagy néhány 100 km mélységből ma még nem tudunk vizsgálati anyagot a felszínre hozni. A bayreuthi Bayerisches Geoinstitut nagynyomású geológiai laboratóriumában 28 GPa nyomásig és 2200 °C hőmérsékletig van lehetőség arra, hogy a felső földkéreg különböző rétegeire jellemző körülmé-

1. ábra. A földkéreg keresztmetszetének sematikus képe. A nyilak a kéregrészek mozgási irányait igyekeznek jelezni. (Louise H. Kellogg szíves engedélyével [1].)





2. ábra. Egyszerű kristályos anyag atomjainak sematikus képe egy többlet betolt atomsíkkal. A betolt atomsík határoló éle, amit a fordított T jelez, egy éldiszlókáció. A szaggatott vonallal jelölt bal felső rész hibátlan, tökéletes kristály.

nyek között állítsunk elő kőzetmintákat. A nem túlságosan nagy nyomáson, illetve nem túl magas hőmérsékleten előállított kőzetminták esetében a nyomás, illetve magas hőmérséklet megszüntetése után megmarad a bennük kialakult kristályszerkezet. Sőt, ezeket be is lehet helyezni a transzmissziós elektronmikroszkópba (TEM-be), és át lehet világítani anélkül, hogy az elektronsugár tönkretenné a vizsgálati anyagot. Ezekben az esetekben a TEM-vizsgálatok egyértelműen azt mutatják, hogy a képlékeny alakváltozás, hasonlóan a fémekhez, diszlókációk mozgása révén megy végbe. (A diszlókációk a képlékeny alakváltozás szempontjából alapvető fontosságú, vonalszerű kristályhibák. Részletesebb leírásukra a továbbiakban még visszatérünk.)

A felső földkéreg legalsó rétegében, tehát mintegy 800 km mélységben, a kéreg egyik fő alkotó része az  $\text{MgSiO}_3$  kémiai összetételű kőzet, amely perovszkítszerkezetben kristályosodik. A perovszkit egy olyan ortorombos elemi cella, amelynek két alapéle, illetve magassága rendre: 0,477, 0,93, illetve 6,98 nm, a lapok hajlásszögei természetesen mind derékszögek, összesen 4 molekulát és ennek megfelelően 20 atomot tartalmaz. A földkéregnek ebben a mélységében a nyomás, illetve a hőmérséklet mintegy 20–25 GPa, illetve 1400–1800 °C. A  $\text{MgSiO}_3$  molekula ilyen körülmények között kristályosodik az említett perovszkítszerkezetben. A Bayerisches Geoinstitut nagynyomású geológiai laboratóriumában sikerült a 800 km körüli mélységben leginkább előforduló perovszkitot szintetikusán előállítani, és szerkezeti változás nélkül környezeti körülmények között, vagyis szobahőmérsékleten, atmoszférikus nyomáson, megtartani. Az első elektronmikroszkópos vizsgálatok során azonnal kiderült, hogy bár a perovszkitot meg lehet tartani környezeti körülmények között, ám az elektronsugár hatására az anyagminta azonnal amorfizálódik, és így a további vizsgálatok számára alkalmatlanná válik. Az elektronsugár hatására bekövetkező sugárzási károsodás közismert az elektronmikroszkópiában, és, sajnos ebben az esetben is ez okozza azt, hogy a perovszkit elektronmikroszkópos módszerrel nem vizsgálható.

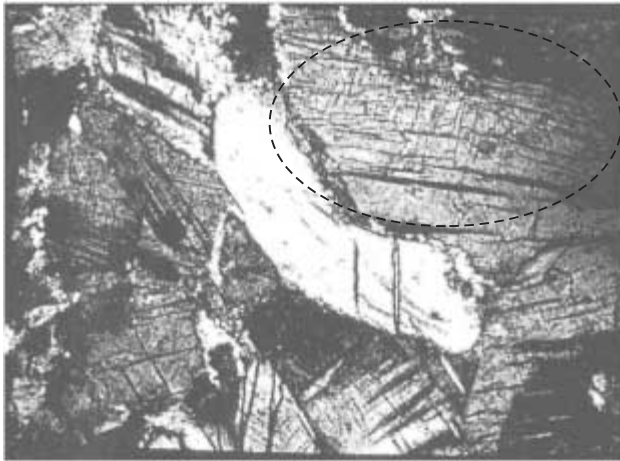
A képlékeny alakítás során oly fontos szerepet játszó diszlókációk vizsgálatának egyik alternatív módszere a röntgen vonalprofil-analízis (RVA) [2]. A tökéletes, hibátlan kristályok úgy szórják a röntgensugárzást, mint végtelen kiterjedésű háromdimenziós rácsok. A különböző irányba szórt sugárnyalábok szinte végtelen vékonyak, a detektorban észlelt lenyomataik, amelyeket diffrakciós maximumnak nevezünk, szinte végtelenül kicsiny kiterjedésű pontszerű foltok, amelyek intenzitáseloszlása deltafüggvényhez hasonlít. (A matematikai deltafüggvény egyaránt végtelenül keskeny és magas.)

Fémek, ötvözetek és, amint előbb említettük, kerámiák, köztük a kőzetek alakváltozása nyírási deformációval megy végbe. Nyírás közben az anyag egyes rétegei elcsúsznak egymáson. Ha egy egész anyagdarab egyszerre csúszna el a másik fölött, akkor ehhez az elcsúsztatáshoz acélok esetében mintegy 3–400 GPa feszültségre lenne szükség. Ezzel szemben a tapasztalat az, hogy ennek a feszültségnek durván az ezredrésze is elegendő a képlékeny alakváltozás megindításához. Ezt a nyilvánvaló ellentmondást 1934-ben három fizikus magyarázta meg, egymástól függetlenül, a diszlókáció fogalmának bevezetésével [3]. Megjegyzendő, hogy a három kutató, *Geoffrey Ingram Taylor*, *Egon Orowan* és *Michael Polanyi* közül a két utóbbi, vagyis Orowan Egon és Polányi Mihály, magyar származású.

A diszlókáció egyik legegyszerűbb típusát, az éldiszlókációt, úgy képzelhetjük el, hogy az anyagot bevágjuk az atomsíkokkal párhuzamosan egy él mentén, majd a bevágásba, a bevágás végéig egy további atomsíkot tolunk be. Ezt szemlélteti a 2. ábra, amelyen a bevágás a fordított T-ig terjed. Az ábra szaggatott vonalakkal határolt bal felső részén hibátlan kristály látható. Az is jól látszik, hogy a diszlókáció egy vonal mentén, a betolt „többlet” atomsík határvonala mentén húzódik. Ha az anyag felső és alsó részét nyíró erők alkalmazásával egymáson elcsúsztatjuk, elegendő, hogy a fordított T-vel jelölt atomsík fokozatosan úgy mozduljon el, hogy közben mindig csak egyetlen atomsíknyi nyírás következzen be. Ez a mechanizmus teszi lehetővé, hogy a nyírási deformáció 3–400 GPa helyett csupán 3–400 MPa feszültséget igényel.

A 2. ábrán jól látható, hogy a diszlókáció környezetében különösen a függőleges atomsíkok erőteljesen görbültek. A továbbiak szempontjából lényeges észrevennünk, hogy jelen esetben a vízszintes atomsíkokat ez a diszlókáció szinte érintetlenül hagyja. Azt mondhatjuk, hogy a diszlókáció egy extrém módon anizotróp kristályhiba.

A röntgensugarak elhajlását a kristályhibák, különösen a diszlókációk, jelentős mértékben megzavarják, ami elsősorban abban jelentkezik, hogy a deltafüggvényyszerű elhajlási maximumok erőteljesen kiszélesedett intenzitáseloszlást mutatnak. Azt mondjuk, hogy a diszlókációk vonalszélesedést okoznak. Ugyanakkor ez a vonalkiszélesedés híven követi a diszlókációk anizotrópiáját. A 2. ábra példájánál maradva ez azt jelenti, hogy ha a röntgensugarakat, például, jobbról ejtjük a kristályra, és azok az erősen görbült atomsíkokon reflektálódnak, akkor az vonalkiszélesedés jelentős lesz. Ezzel szemben, ha fentről



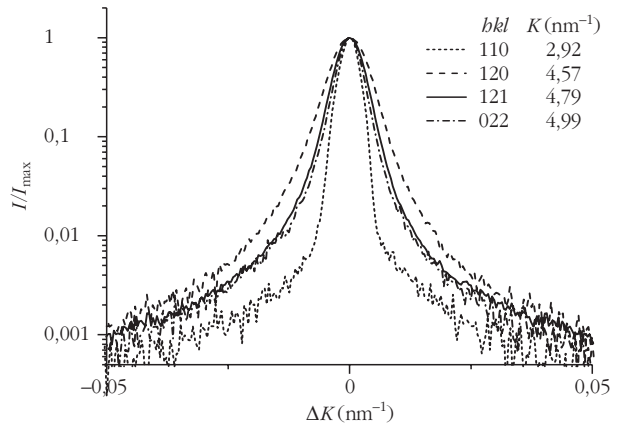
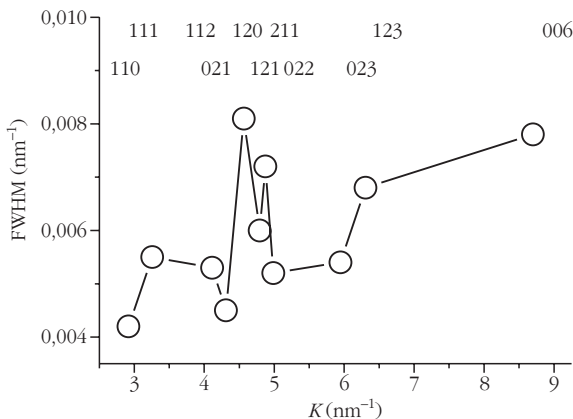
3. ábra. 23 GPa nyomáson és 1400 °C hőmérsékleten szintetikusán, a bayreuthi Bayerisches Geoinstitut nagynyomású geológiai laboratóriumában előállított MgSiO<sub>3</sub> perovszkit fénymikroszkópos képe. A szaggatott vonallal körülhatárolt rész az a kristály, amelyet a röntgen vonalprofil-analízis módszerével megvizsgáltunk [2].

ejtjük a röntgensugarakat a kristályra, akkor azok az érintetlen, tökéletes atomsíkokon reflektálódnak, és az ilyen elhajlási maximum változatlanul éles, deltafüggvényszerű intenzitáseloszlást mutat.

A vonalkiszélesedést a kontrasztfaktorokkal (ezeket a továbbiakban *C*-vel jelöljük) jellemezhetjük. *C* értékei nagyobbak, illetve kisebbek aszerint, hogy az adott elhajlási maximum jobban vagy kevésbé szélesedik ki a különböző módon és különböző sűrűséggel elhelyezkedő diszlokációk hatására. A *C* értékeinek kísérletes meghatározását a már említett röntgen vonalprofil-analízis (RVA) módszere teszi lehetővé [2].

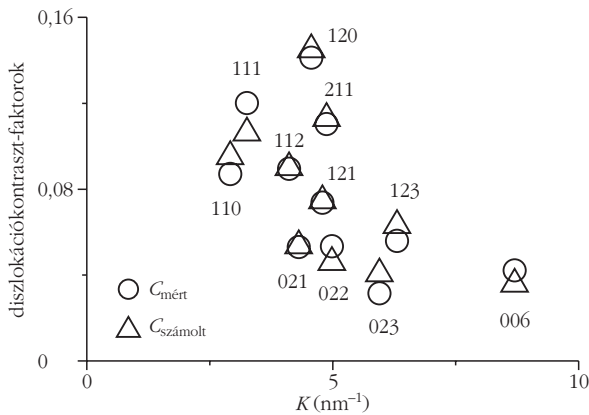
Az RVA-vizsgálatokhoz a Bayerisches Geoinstitut nagynyomású geológiai laboratóriumában 23 GPa nyomáson és 1400 °C hőmérsékleten előállított MgSiO<sub>3</sub> perovszkit optikai mikroszkópos képét a 3. ábra mutatja. Ezen jól látható, hogy a minta több nagyobb, mintegy 1/4 vagy 1/2 mm átmérőjű kristályból áll. Jól elkülönül, például, a kép közepén fehéren világító nagy, kifli alakú kristály. Ahhoz, hogy a diszlokációk jellemző anizotrópiája ne átlagolódjon ki a különbözőképpen irányított

5. ábra. Az elhajlási maximumok félérték szélessége (FWHM) *K* függvényében.



4. ábra. Négy kiragadott röntgen elhajlási maximum intenzitáseloszlása logaritmusos intenzitáskálán a maximumra normálva [2]. Az egyes elhajlási maximumok rendjét, illetve irányát a *hkl* indexek jelölik. Az elhajlás mértékét  $K = 2 \sin \theta / \lambda$ -val jellemeztük, ahol  $2\theta$  az elhajlás szöge és  $\lambda$  a sugárzás hullámhossza. Az intenzitáseloszlást  $\Delta K = (2 \cos \theta / \lambda) \Delta \theta$  függvényében adtuk meg.

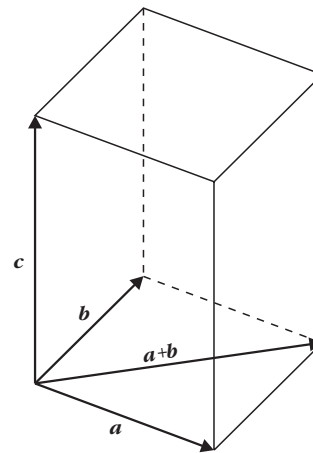
kristályokról szórt röntgensugarak összegződése révén, a diffrakciós vizsgálatokat lehetőleg egyetlen kristályon kell elvégezni. Az ehhez kiválasztott viszonylag nagyobb kristályt az ábrán szaggatott vonal jelöli. A röntgenszórási kísérletben ezt a kristályt egy igen kis keresztmetszetű röntgennyaláb világítja meg. A mintaterület kiválasztása és a röntgennyaláb pozicionálása a mintán egy speciális mikroszkóp és TV-monitor segítségével történik. Néhány tipikus elhajlási maximum intenzitáseloszlását láthatjuk a 4. ábrán. A logaritmusos intenzitáskála jól mutatja az igen jó jel/zaj értékeket. Azt is megfigyelhetjük, hogy jelentős különbség van a különböző elhajlási maximumok kiszélesedése között. A kiszélesedés kvalitatív mértékét jól szemléltethetjük, ha az intenzitás maximumának feléhez tartozó vonalszélességeket ábrázoljuk az elhajlás függvényében. Ezt láthatjuk az 5. ábrán. Az elhajlás mértékét az elhajlás szögértéke helyett a fizikailag sokkal megfelelőbb  $K = 2 \sin \theta / \lambda$  mennyiséggel jellemezhetjük, ahol  $2\theta$  az elhajlás szöge és  $\lambda$  a sugárzás hullámhossza. Az ábrán jól megfigyelhetjük, hogy különböző irányokban a vonalkiszélesedés mennyire változatos, egyáltalán nem monoton az elhajlás függvényében. Az elhajlási irányokat hármast-indexekkel jellemezzük, hiszen a röntgensugarak háromdimenziós rácson hajlanak el. A hármast-indexek felfoghatók egy vektor három komponensének, ahol ezek a vektorok az elhajló röntgensugarak terjedési irányaiiba mutatnak. A hármast-indexeket legnagyobb közös osztóikkal elosztva a Miller-indexeket kapjuk, amelyek egyúttal azon atomsíkcsereg normálvektorai, amelyekre az elhajlás bekövetkezett. Például a 022 hármast-indexnek megfelelő Miller-indexek: 0, 1 és 1, amelyek egyúttal a reflektáló atomsíkcsereg normálvektorának a koordinátái. Az 5. ábrán látható, hogy vannak irányok, például az 120 és 211 indexűek, amelyekben a vonalkiszélesedés kiugróan nagy, ugyanakkor a 022 és 023 irányokban egészen kicsiny. Már ez a kvalitatív viselkedés is arra utal, hogy a kristályrács torzulásai igen jelentős mértékben irányfüggők, anizotrópok, amit csak jól meghatározott típusú és irányított diszlokációk okozhatnak.



6. ábra. A mért,  $C_{mért}$  és számolt,  $C_{számolt}$  diszlokáció-kontrasztfaktorok  $K$  függvényében.

A következő lépésben, az egyes elhajlási maximumok tüzetesebb vizsgálata alapján, minden egyes elhajlási irányhoz meghatározhatjuk a mért diszlokáció-kontrasztfaktorokat, a  $C_{mért}$  értékeket. Ezeket a 6. ábrán nyitott körök jelölik a  $K$  elhajlási paraméter függvényében. Ezt követően számba kell venni a lehetséges diszlokációtípusokat és diszlokációirányokat, amelyeket a kristályszerkezet alapján jól meghatározott elvek segítségével kaphatunk meg. E megfontolások részletei megszire vezetnének, az érdeklődő olvasó számára Kovács István és Zsoldos Lehel kitűnő könyvét ajánljuk [3]. Any nyit érdemes itt megjegyezni, hogy a diszlokációk, többek között, az úgynevezett Burgers-vektorral jellemezhetők. A 2. ábrán látható diszlokáció Burgers-vektorát, például, úgy kaphatjuk meg, hogy valahonnan elindulva úgy járjuk körül a diszlokációt, vagyis a fordított T-vel jelölt papírra merőleges vonalat, hogy egy-egy adott kristálytani irányba mindig ugyanannyi atomtávolságnyt (pontosabban, kristályrác vektornyt) lépünk. Az ilyen körüljárás végén nem jutunk vissza a kiindulási pontba, hiszen a fordított T fölötti anyagrészbe betoltunk egy „többlet” atomsíkot. A körüljárás kezdő és végpontja közötti különbség az adott diszlokáció Burgers-vektora. Már ebből a definícióból is kitűnik, hogy Burgers-vektor csak kristályrácvektor lehet. A kristályrác által diktált lehetőségek alapján kiszámíthatjuk az elvileg lehetséges diszlokáció-kontrasztfaktorokat, a  $C_{számolt}^*$  értékeket. A csillag azt kívánja itt érzékeltetni, hogy ezek az értékek mindig egyetlen meghatározott diszlokációhoz tartoznak.

Az  $MgSiO_3$  perovszkit-kristályszerkezete által megengedett lehetséges Burgers-vektorokat sematikusan a 7. ábra mutatja. Látható, hogy viszonylag nagyszámú kristályrácvektor – a három alapvektor,  $a$ ,  $b$  és  $c$ , valamint a  $c+a$  rácsvektor – jön szóba, mint lehetséges Burgers-vektor. Az imént mondottaknak megfelelően minden Burgers-vektorhoz egy-egy  $C_{számolt}^*$  kontrasztfaktorérték tartozik. Az adott kristályban természetesen több diszlokációtípus, különböző irányítottással is előfordulhat. Ezt úgy vesszük figyelembe, hogy megengedik az egyes diszlokációkhoz tartozó  $C_{számolt}^*$  kontrasztfaktorértékek súlyozott lineáris kombinációját. Az ilyen súlyozott lineáris kombinációkból állítják elő a  $C_{számolt}$  értékeket, amelyek közül a legkisebb négyzetek módszerével választják ki



7. ábra. Az ortorombos  $MgSiO_3$  perovszkit-kristályszerkezete által megengedett diszlokáció Burgers-vektorok elhelyezkedése a perovszkit-kristályrác sematikus elemi cellájában.

azokat, amelyek a  $C_{mért}$  értékekkel a legjobban megegyeznek. A numerikus analízis eredményeként csak  $a$  és  $b$  rácsvektorok, illetve azok 50–50 százalékos lineáris kombinációja teljesíti azt a követelményt, hogy az ezeknek megfelelő  $C_{számolt}^*$  és  $C_{mért}$  kontrasztfaktorértékek a mérési hibán belül megegyeznek egymással. Az így kapott kontrasztfaktorértékeket a 6. ábrán nyitott háromszögek jelölik.

Az itt bemutatott vizsgálatok két dolgot bizonyítottak egyszerre. Egyrészt azt, hogy a 800 km-es mélységben uralkodó körülmények között is, vagyis 1400–1800 °C hőmérsékleten 20–25 GPa nyomás mellett, a földkéreg kőzeteinek képlékeny alakváltozása diszlokációmozgás révén megy végbe. Másrészt azt, hogy ebben a mélységben az  $MgSiO_3$  kémiai összetételű perovszkitban csak és csakis az ortorombos elemi cella alapvektorai, azaz az  $a$  és  $b$  kristályrácvektorok működnek mint Burgers-vektorok. A földkéreg tektonikus mozgásának leírásában mindkét megállapítás nagyban megkönnyíti a valóságnak megfelelő modellezést. Itt jegyezzük meg, hogy az elmúlt években sikerült meghatározni a még mélyebben fekvő földkéregretek kőzeteinek kristályszerkezetét. Az ugyanilyen kémiai összetételű molekula egy úgynevezett posztperovszkit-szerkezetben kristályosodik, amely a perovszkitnak egy kristálytani módosulata. A posztperovszkit-szerkezetet sikerült laboratóriumi körülmények között szintetizálni, azonban a kőzetnek ezt az állapotát már nem lehet környezeti körülmények közé feltárni. Ez azt jelenti, hogy a képlékeny alakítás mechanizmusainak vizsgálata a kőzet ezen állapotában csak in-situ módon, vagyis csak magas hőmérsékleten és nagy nyomáson végezhető el. A kihívás nagy, de a vizsgálatok végrehajtásának tervezése már elkezdődött, és remélhetőleg erről is hamarosan be tudunk számolni.

## Irodalom

1. Az ábra Louise H. Kellogg munkája, a következő honlapon található: <http://www-geology.ucdavis.edu/~kellogg/#research>
2. P. CORDIER, T. UNGÁR, L. ZSOLDOS, G. TICHY: *Dislocations creep in MgSiO3 perovskite at conditions of the Earth's uppermost lower mantle* – Nature 428 (2004) 837–840
3. KOVÁCS I., ZSOLDOS L.: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás* – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.

# VÉKONYRÉTEGEKRŐL, NANOSTRUKTÚRÁKRÓL A NAPELEM ÜRÜGYÉN

Nemcsics Ákos  
MTA MFA

Mostanában sok szó esik a globális környezeti problémák kapcsán a megújuló energiák kiaknázásának lehetőségeiről. Ha a Földet érő napsugárzás által szállított energiának akár csak 0,1%-át hasznosítani tudnánk mielőtt – mint minden energiafelhasználás „végterméke” – végül is hővé alakulna, az bőven fedezné a mai és holnapi globális energiaigényt. Megjegyzendő, hogy ez a gondolat a „real time” napenergia felhasználására korlátozódik. Más energiaforrások (beleértve a „nem real time” napenergiát, azaz a fosszilis energiát is) hasonló mértékű, szimultán hasznosítása a Föld felmelegedésével járna.

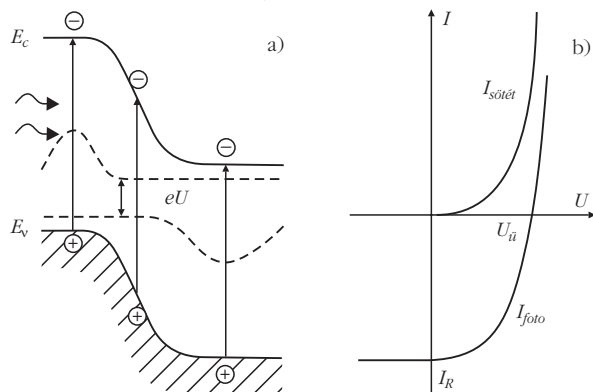
A legsokoldalúbban felhasználható, vagyis a legértékesebb energiafajta az elektromos energia. A napenergiát közvetlenül elektromos energiává átalakító eszköz a napelem. Működésének lényege abban áll, hogy a napsugárzás fotonjaival szabad töltéshordozókat keltünk a napelemből alkotó félvezetőanyagban, majd az így keletkezett pozitív és negatív töltéshordozókat egy beépített tér segítségével különválasztjuk. A működést legegyszerűbben egy  $pn$ -átmenet példáján magyarázhatjuk el. Egy  $E_g$  tilossáv-szélességű félvezetőben  $E_g$ -nél nagyobb energiával rendelkező fotonok lyuk–elektron párokat generálnak, melyeket a  $pn$ -átmeneten fellépő elektromos tér elkülönít egymástól. Az elektronok az  $n$ -oldalra, a lyukak a  $p$ -oldalra sodródnak, és ott felhalmozódnak (1.a ábra). A keletkezett fotoáram azonos irányú az átmenet záró irányú sötétáramával. Az eszköz az energiáját az átmenet két oldalán létrejött többségi töltéshordozó felhalmozódásából nyeri. A  $pn$ -átmenet sötétben és megvilágítás hatására mérhető áram–feszültség karakterisztikája az 1.b ábrán látható. Az átmenet eredő árama a sötétáram és a fotoáram különbségéből adódik:  $I = I_s(e^{qU/kT} - 1) - I_{\text{foto}}$ . A napelem esetében, a galvánelemhez hasonlóan, rövidzárási áramról, illetve üresjárási feszültségről beszélhetünk. A napelem fontos jellemzői a kitöltési tényező és a hatásfok. A kitöltési tényező a karakterisztikára jellemző adat, amely a napelemtől maximálisan levehető elektromos teljesítmény, valamint a rövidzárási áram  $I_r$  és az üresjárási

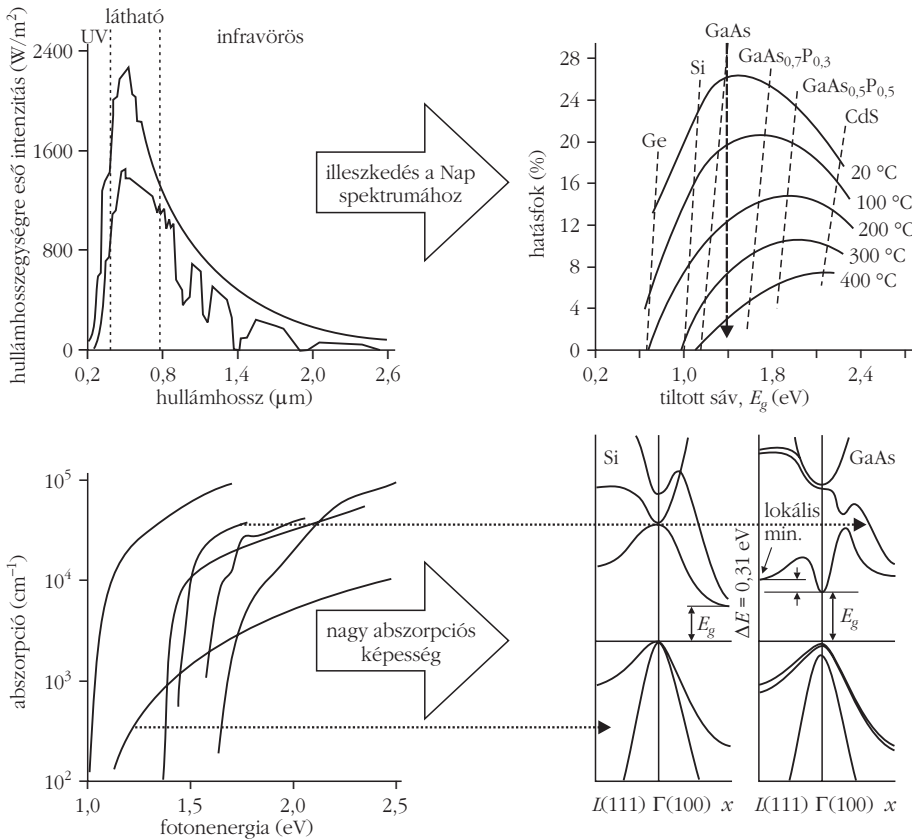
si feszültség  $U_{ii}$  szorzatának hányadosa. A hatásfokot a levehető maximális elektromos teljesítmény és a beeső fényenergia hányadosa adja [1].

## Paradigmaváltás a napelem-technológiában

Említettük, hogy a napelem hatásfokának meghatározásánál fontos paraméter a félvezető-anyag tilossávjának nagysága is. Ez érthető, hiszen ha a beeső foton  $E_{\text{fot}}$  energiája kisebb, mint a tilossáv szélessége, akkor a foton nem kelt töltéshordozópárokat. Töltéshordozó-képződés akkor történhet, ha a foton energiája legalább a tilossávnak megfelelő vagy annál nagyobb. Az  $E_{\text{fot}} - E_g$  többletenergia, hő formájában disszipálódik, fonon lesz belőle. Ha túl kicsi tilossáv-szélességű félvezetőt választunk napelem céljára, akkor sok lyuk–elektron pár képződik, de nagy lesz a hőtermelődés is, ez pedig a hatásfokot rontja. Ha túl nagy a tilossáv-szélesség, akkor a fotonok jelentős része nem tud töltéshordozópárokat kelteni. A napsugárzás spektrumának figyelembevételével kell léteznie egy optimális tilossáv-szélesség-értéknek. A működést leíró egyenletekből kimutatható, hogy a tilossáv-szélesség növekedésének hatására a fotoáram csökken, az üresjárási feszültség pedig nő. Az optimális feltételek meghatározásához az  $U_{ii} I_{\text{foto}}$  szorzat maximumát kell keresnünk. A napsugárzás spektrumát is figyelembe véve az elméletileg elérhető maximális hatásfok a tilossáv-szélesség függvényében meghatározható (2.a ábra). Az optimális tilossáv-szélesség 1,4 eV-nál van (pl. GaAs) [2]. A grafikon által mutatott számítás egy egyszerű  $pn$ -átmenetre vonatkozik. A valóságban a különböző napelem-konstrukciók hatásfokai jelentősen eltérhetnek az elméletileg számítottól. A negatív irányú eltérés okozói a különböző veszteségek (termikus, reflexiós, rekombinációs stb.). Az eltérés lehet pozitív is különleges cellakonstrukciók (pl. több, különböző anyagból készült napelembretekúra egymásra integrálása) esetén. A másik természetesen követelmény a félvezetőanyaggal szemben a nagy abszorpciós képesség, mely a kristályos anyagok esetében direkt sáv szerkezetet jelent (2.b ábra). A napelemgyártásban korábban az egyik leggyakrabban alkalmazott félvezetőanyag a kristályos szilícium volt. A szilícium indirekt sáv szerkezetű (a gerjesztéshez energiefelvétel nélkül fononkölcsonhatásra is szükség van) és az ebből eredő gyenge abszorpciós képessége, valamint az 1,1 eV tilossáv-szélessége miatt nem a legmegfelelőbb anyag napelem előállítására. (Például a félvezetőszelvény vastagság – 300–400  $\mu\text{m}$  – eszközben sem abszorbeálódik maradéktalanul a beeső fény.) A Si csupán kiforrott technológiájának köszönhető alkalmazását a napelemgyártásban. Mostanra a kristályos szilíciumot szinte kiszorították az alkalmasabb elektromos sáv szerkezetű félvezetőanyagok. (A mikroelektronikai ipar melléktermékeként keletkező kevésbé jöminőségű

1. ábra. a)  $pn$ -átmenet sávbrája fotogerjesztéssel, b)  $pn$ -átmenet áram–feszültség karakterisztikája sötétben és megvilágítva





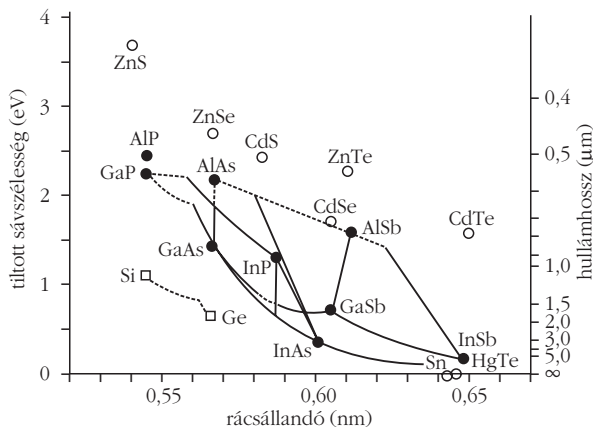
2. ábra. A megfelelő sávszerkezetű anyag megválasztása, a) egyszerű  $pn$ -átmenetes napelemstruktúra esetén 1,4 eV tilossáv az ideális, b) fontos a nagy abszorpciós képesség, mely kristályos félvezető esetén direkt átmenetet jelent.

Si-ot azért továbbra is felhasználják napelemgyártásban.) A nagy abszorpciós képességű anyagok használata miatt a hagyományos cellastruktúrák és technológiák teljesen megváltoztak [3].

## Vékonyréteg-napelemek

Napelemkészítésre nemcsak az elemi félvezetők, hanem a vegyület-félvezetők is használhatóak. Ezek tulajdonságai (sávzélesség, abszorpciós képesség stb.) széles hatá-

3. ábra. Néhány fontos félvezetőanyag tilossávja a rácscsillandó függvényében. A folytonos vonal a direkt átmenetet, a szaggatott az indirekt átmenetet jelenti.



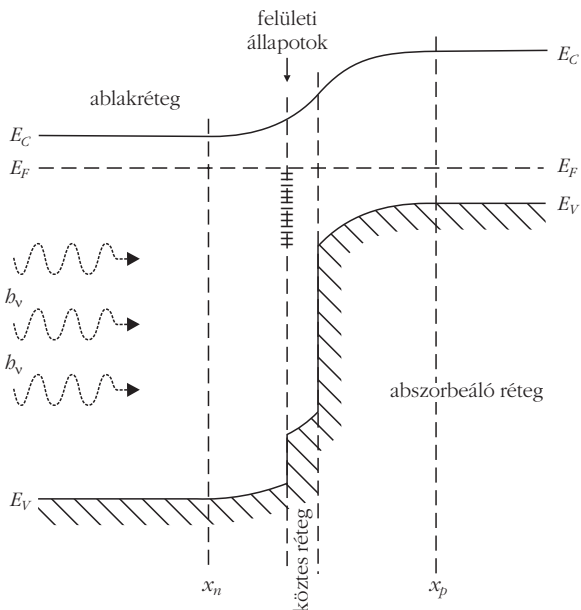
rok közt változhatnak nemcsak az alkotóelemek, hanem azok arányainak függvényében is. Közöttük igen sok a direkt sáv-szerkezetű (3. ábra).

A direkt sáv szerkezetű félvezetők alkalmazása a napelemkészítésben alapvetően megváltoztatta a Si-technológiában használatos cellakonstrukciót. Ezeknél az anyagoknál elegendő néhány  $\mu m$  vastagságú réteg a fény teljes abszorpciójához. Ezek a nagyon vékony rétegek nem önhordóak, ezért szükség van egy vastagabb hordozó anyagra, melyre ezek leválaszthatóak. Ilyen hordozó lehet például üveg vagy fémfólia. A vékonyréteg-napelemek előnye az olcsó, egyszerű technológia, az anyagtakarékosság és a lehetséges nagy modulméret [4]. Az egyik legperspektivikusabb napelemanyag a  $CuInSe_2$  (a szakirodalomban CIS rövidítéssel szerepel). Mint a legtöbb kalkogénid típusú félvezető, ez is elsősorban  $p$ -típusú polikristályos formában állítható elő. A napelem működéséhez szüksé-

ges beépített tér az anyagban nemcsak inhomogén adalékolással ( $pn$ -átmenet létrehozásával), hanem két eltérő anyag heteroátmenetével is megoldható. A fent említett  $p$ -típusú anyaghoz (melyből  $n$ -típus gyakorlatilag nem készíthető) választható egy olyan, vele technológiailag kompatibilis másik anyag, mellyel a beépített tér létrehozható. A vékonyréteg-napelemeknél gyakori egy nagyobb tilossávzélességű  $n$ -típusú anyag, egy átlátszó vezető oxid (TCO), az ablakanyag heteroátmenetének használata. A  $p$ -típusú félvezető – a tilossávjából következően – az abszorbeáló réteg, az ablakanyag pedig a fotoáram felfogására szolgál (4. ábra) [4]. Az abszorber összetételének változtatásával (In helyére Ga, Se helyére S kerülhet) a tilossávzélesség 1 és 2 eV között változtatható, így beállítható a napfénykonverzió szempontjából optimális 1,4 eV tilossávzélesség. CIS-napelem esetében az ablakanyag ZnO ( $E_g = 3,2$  eV), amely egyben antireflexiós réteggként is szolgál. Más abszorber esetében ablakanyagként használatos még az  $In_2O_3$  ( $E_g = 3,2$  eV), a  $SnO_2$  ( $E_g = 3,5$  eV), illetve ezek keveréke, az ITO (indium-ón-oxid).

Az eddig tárgyalt félvezetőanyagok (poli)kristályos szerkezetűek, de a napelemkészítésben igen elterjedt az amorf Si is. Az amorf anyagokban a rövidtávú rendezettség miatt az elektromos sáv szerkezet nem olyan egzakt, mint kristályos anyagokban. A rövidtávú rendezettségéből következően jellemző rájuk a belső feszültségből adódó, nagyszámú telítetlen kötés. A szilárdtest-félvezetők kristályhibái a tilossávban lokalizált energiaállapo-





4. ábra. Átlászó vezetőoxidokkal ellátott vékonyréteg félvezető heteroátmenetének sávdiagramja.

tokat hoznak létre. Az amorf anyagokban a lokalizált állapotok száma olyan nagy, hogy a szilárdtest-félvezetőknél szokásos tilossáv „eltűnik”. Ennek ellenére mégis definiálhatunk egy látszólagos tilossávot a kis és nagy mozgékonyaságú töltéshordozó-állapotoknak megfelelően. A rétegleválasztás technológiája itt is, mint más vékonyrétegeknél alapvetően meghatározza az anyag tulajdonságait. A legelterjedtebb leválasztási technológia a plazmával segített gőzfázisú kémiai lecsapatás (PECVD). Az amorf anyag leválasztása a reaktorban  $\text{SiH}_4$  bontása által történik, ahol a hordozó gáz hidrogén. Az adalékolás szintén gázok bevezetésével történik. (*p*-típus esetén  $\text{B}_2\text{H}_6$ , *n*-típus esetén  $\text{PH}_3$ ). A rétegleválasztás során hidrogén épül be az amorf anyagba, lekötve a szabad kötések. Ez az a-Si:H, ennek tilossáv szélessége körülbelül 1,7 eV. A kristályos Si-mal ellentétben a rövid távú rendezettségéből következő sáv szerkezet miatt a hullámhossz-kiválasztási szabály itt nem korlátozza az abszorpciót. Az ilyen technológiával készült napelemben idővel az UV-sugárzás hatására a hidrogénkötések egy része felhasad. Ennek során az üresjárási feszültség konstans marad, míg a rövidzárási áram egy határérték eléréseig csökken. Ezért ezt a napelemtípust felhasználás előtt előregíteni szokták.

A napenergia konverziója céljára ideális tilossáv szélesség csak néhány félvezető sajátja. Az energiahasznosítás optimalizálása elérhető két egymásra integrált különböző tilossávú félvezetőből készült *pn*-átmenet segítségével is, ahol például a felső anyag tilossávja 1,9 eV, az alsóé 1,2 eV. Ezt a struktúrát nevezik a szakirodalomban tandemcellának. A napelem hatásfoka tovább növelhető több különböző tilossáv szélességű anyagból álló szerkezettel. A tilossáv változtatható amorf Si esetén például különböző mennyiségű Ge hozzáadásával, ez az a-SiGe:H. De heteroátmenetet képezhetünk más anyagokkal is, mint a CdS vagy a CIS. Itt jegyzendő meg, hogy amorf Si- és SiGe-rétegeket előállíthatunk katódporlasztással is. Ezen

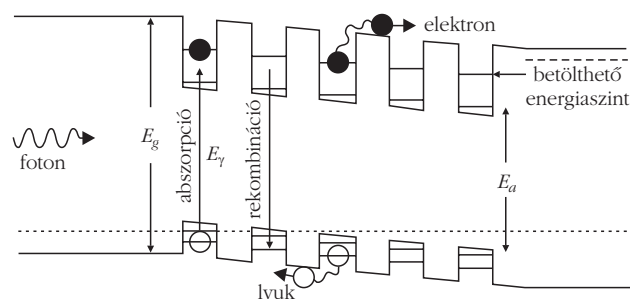
technológia egyik előnye, hogy a kötések felhasadásából eredő rétegradegradáció itt nem figyelhető meg, valamint, hogy ez még a kémiai lecsapatásnál is olcsóbb technológia, ami a napelemgyártás esetében nem elhanyagolható szempont. Előny még az egyszerűen változtatható SiGe-összetétel, valamint az, hogy az alacsony leválasztási hőmérséklet miatt a réteg akár műanyagfóliára is leválasztható [5, 6]. Félvezető eszközöket kísérleti jelleggel készítettek már ebből az anyagból, de a megoldandó kérdések miatt (pl. az adalék beépülési folyamata) az áttörésre még várni kell.

## A legnagyobb hatásfokú napelem

A világűrbe kilőtt objektumok (pl. műholdak) tartós energiaellátására is legkézenfekvőbb lehetőségként a napelem kínálkozik. Ez olyan napelemfajták kifejlesztését kívánja meg, amelyek esetében nem az olcsó technológia, hanem az elérhető legnagyobb hatásfok kap prioritást. Míg az egyszerű heteroátmenetet tartalmazó struktúrával az elméletileg elérhető maximális hatásfok 30% alatti, addig összetett struktúrákkal ez a határ átléphető, mint azt az előzőekben bemutatott kétféle tilossáv szélességű félvezetőből álló tandemcella esetében már jeleztük. A napsugárzás spektrumának még hatékonyabb hasznosítása további, alkalmas tilossáv szélességű félvezetők egybeintegrálásával növelhető. Ezek a többsávú eszközök. A rétegszámok növelésének a technológiailag lehetséges összeintegrálható különböző félvezetők véges száma és azok adott tilossáv szélessége szab határt.

A többréteges napelemcellák igen ígéretes fajtája a kvantumvölgyeket tartalmazó (MQW, multiple-quantum-well) napelemcella. Ezzel a cellatípussal 40% feletti hatásfokot értek el [4]. A fentebb említett technológiai limitet ez a cellatípus kvantummechanikai effektus felhasználásával oldja fel. E napelem felépítésének lényege az, hogy két különböző tilossáv szélességű anyag felhasználásával változó szélességű kvantumvölgyeket hozunk létre (5. ábra). A kialakuló potenciálgödrökben a lehetséges energiaállapot beállítható a potenciálgátak távolságával. Ezáltal akár két eltérő tilossáv szélességű félvezetőből különböző méretű potenciálgödröket felhasználásával változó effektív sáv szélességű napelem is építhető. A gátak szélességét és az eszköz előfeszítését úgy alakítják, hogy az áramvezetés rezonáns-alagutazással történhessen. A megvalósításhoz ideális anyag a már említett III-V

5. ábra. A nagy hatásfokú, a töltéshordozókat sorosan gyűjtő MQW-napelem sávdiagramja.

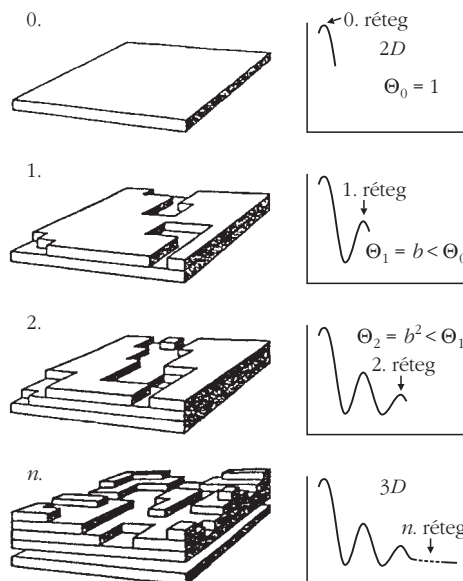


típusú félvezetőcsalád. A GaAs-énál kisebb  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  és a GaAs-énál nagyobb  $\text{Ga}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$  tiltott sávú félvezetőből felépített struktúrákat mutat az 5. ábra. A struktúrákat egy pindióda intrinsic részében hozzák létre. A méretekre jellemző, hogy 1  $\mu\text{m}$ -en belül körülbelül száz kvantumvölgyet hoznak létre [4]. Ha a napelemet a  $p$  és  $n$  részén vezetjük ki, akkor a völgyek sorosan kapcsolódnak. A geometriát és az előfeszítést úgy kell megoldani, hogy a fotoáram a kedvező rezonáns-alagutazási állapotban folyjék, melyhez kis méretű nyitó irányú előfeszítés szükséges. Akkor is folyhat áram, ha nem áll fenn ez az alagutazási állapot, ugyanis a völgyekben lévő elektronok termikusan könnyen aktiválódnak. Gyűjthetünk áramot párhuzamosan is. Ebben az esetben a struktúrára merőlegesen páronként besüllyesztett  $n^+$ , illetve  $p^+$ -csatornákat hozunk létre a rétegben, melyek párhuzamosan kapcsolják a kvantumvölgyeket. A kialakuló elektromos tér a töltéshordozókat a völgyekkel párhuzamosan tereli, mely irányban igen kedvezőek a transzporttulajdonságok. Összegezve: a konstrukció előnye nemcsak az, hogy a potenciálgátak távolságával és szélességével az effektív tilossáv szélesség beállítható (igen sok sávú napelem), hanem az is, hogy a rekombináció minimalizálható, valamint az üresjárás feszültség és a rövidzárási áram beállítható [4].

## Szabályozott kristálynövekedés

A fent vázolt struktúrák megvalósításának feltétele a félvezető kristályrétegek igen jól kontrollált növesztése. Technológiailag fontos, tudományosan pedig igen érdekes feladat az epitaxiás növekedés vizsgálata. Ezek a nagyon vékony, akár néhány atomsoros rétegek molekulasugár-epitaxiával valósíthatók meg (MBE: molecular beam epitaxy). Az MBE-rétegnövesztés (a nagy szabad úthossz és a réteg tisztasága miatt) ultranagy vákuumtérben történik. A félvezető hordozó (a megfelelő migrációs úthossz miatt) szabályozottan fűthető mintatartón helyezkedik el. A leválási hőmérséklet általában 200–550 °C között van. A mintatartóval szemben helyezkednek el a molekulaforrások, melyek szűk nyílású fűthető téglécek. A téglécek hőmérsékletének változtatásával a nyíláson kiáramló molekulasugár fluxusa szabályozható. Más epitaxiás eljárásokhoz képest az MBE-eljárásnak több előnye van. Az alacsony leválási hőmérséklet nem segíti a hibahely-generálódást a rétegben, és csökkenti a rétegek közötti diffúziót. Kontrollált alacsony növesztési sebesség biztosítható (0,1–1 atomsor/s). Az anyag összetétele és adalékolása élesen változtatható a molekulaforrások nyitásával-zárásával, amit a sugár útjába helyezett zárszerkezettel oldanak meg. Az MBE-rendszer fémorganikus (MOMBE: metalorganic MBE) vagy egyéb kémiai forrással (CBE: chemical beam epitaxy) kiegészítve a kémiai epitaxiás eljárások előnyeit egyesítheti magában.

A vákuumban történő növesztés a folyamat in-situ megfigyelését teszi lehetővé (röntgen, elektronsugár, optikai stb. módszer). A legelterjedtebb és az egyik legsokoldalúbb módszer a nagyenergiájú sűrűsávú elektron-diffrakció (RHEED: reflection high energy electron dif-



6. ábra. Az RHEED-intenzitásoszilláció és a felületi morfológia változása epitaxiás rétegnövekedés során.

fraction). A felületre 10–30 keV energiájú elektronsugárat bocsátunk  $1^\circ$ – $4^\circ$  beesési szögben. A felületről távozó reflektált-diffraktált elektronsugár térbeli eloszlása és annak időbeli intenzitásváltozása igen sok információt hoz a felületről [7]. Segítségével meghatározható a felület állapota, rekonstrukciója, morfológiája, a rétegnövekedés sebessége, a réteg összetétele stb. A szabályos rétegepülés során a megfigyelhető intenzitás oszcillál, melynek periódusa általában egy monorétegnek felel meg. Az oszcilláció kezdőfázisa anyagtól, növesztési paraméterektől és a geometriától (beesési szög, azimut szög) stb. függ. Ezek hatásának megfejtése az oszcilláció kiértékelése szempontjából alapvető fontosságú feladat [8]. Az MBE-eljárás egyik nagy előnye, hogy a molekulaforrások segítségével egyazon növesztési folyamat alatt a növekedő anyagok akár többször is változtathatók, ahogyan ez az előbbieken említett MQW-napelem esetében szükséges. A GaAs-re növesztett  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  esetében csak a tilossáv, az  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  esetében a tilossávon kívül még a rácsállandó is változik az összetétel függvényében (3. ábra). Az InAs rácsállandójának eltérése a GaAs-étől 7%. Ha elegendően vékony a struktúra, akkor az epitaxiás réteg kristályrácsa torzul, és laterális irányban felveszi a hordozó rács periodicitását. Ha a réteg vastagsága egy kritikus értéket meghalad, akkor a rácstorzulás során felhalmozódó mechanikai feszültség miatt a struktúra egyszerűen relaxál. Ez a kritikus rétegvastagság, mely nemcsak a réteg összetételétől, hanem a növekedés paramétereitől is függ. Ez az RHEED-oszcilláció viselkedéséből már a növekedés kezdeti szakaszában meghatározható (6. ábra) [9]. Nagy rácsállandó-eltérés – például InAs/GaAs – esetében önszerveződő módon nanostruktúrák alakulnak ki a felületen, melyek növekedés közbeni vizsgálata szintén RHEED-del lehetséges [8]. Nanostruktúra napelemekben nemcsak az MQW-napelem esetében tárgyalt 2D rétegződés formájában fordul elő, hanem, mint a későbbiekben látni fogjuk, 1D és 0D nanostruktúrák is alkalmazásra kerülnek.

## Elektrokémiai napelemek

A fényenergia konverziója elektromos energiává nemcsak félvezető–félvezető átmenettel, hanem félvezető–elektrolit átmenettel is lehetséges. Az elektrolit a félvezetőn átlátszó Schottky-jellegű kontaktust hoz létre, ahol a határfelületen elektrokémiai reakció is létrejön. Az elektrolit–félvezető átmenettel nemcsak elektromos energia, hanem például hidrogén is fejleszthető. Ezt tüzelőanyagcellában elégetve ugyancsak elektromos energiát kaphatunk, a hidrogén azonban hosszabb ideig tárolható, mint az elektromos energia.

A fényenergia megfelelő hasznosulásához, és a határátmeneten elegendő tér kialakulásához fontos a megfelelő félvezető (pl. tilossávszélesség) és elektrolit (pl. redoxpotenciál) megválasztása. Ha a félvezető  $n$ -típusú, akkor a generált töltéshordozópárok közül a tér hatására az elektronok a félvezető belsejébe, a lyukak pedig a határátmenet felé sodródnak. A  $p$ -típusú anyag esetében az ellentétes tér hatására ellentétes irányban haladnak a gerjesztett töltéshordozók. A határátmenetnél töltésátlépés történik a redoxrendszerbe. Majd az  $n$ -típusú esetben oxidált, a  $p$ -típusú esetben redukált részecskék eldifundálása történik a felületről. A töltéstranszfer addig tart, amíg beáll az egyensúly. Ekkor a félvezető és az elektrolit között fotofeszültséget mérhetünk [4].

Az energiakonverzió akkor működik tartósan, ha a redoxrendszer regenerálódó, azaz a félvezetőn oxidálódott vagy redukálódott rendszer a fémelektrodán visszaredukálódik, illetve visszaoxidálódik. A félvezető–elektrolit határfelületen fellépő fotokorrózió ezen cellák egyik legnagyobb problémája. Általában az 1,5 eV körüli, nagy hatékonyságú félvezető elektródok erősen korrodálnak, míg a 4 eV körüliek, melyeknek kisebb a hasznosításuk, többnyire stabilak e korróziójáért szemben. Megfelelő elektrolitválasztással a korrózió csökkenthető, mégpedig olyan módon, hogy a keletkező korróziós termék egyensúlyban legyen a félvezetővel, azaz a redoxpár könnyen oxidálható legyen. A probléma  $n$ -típusú félvezetőre, oxidatív korrózióra megoldott, az így készült cellák stabil működésűek, nem úgy, mint a  $p$ -típus esetében. A redukció során a fél-

vezetőn képződő fémréteg megváltoztatja a viszonyokat. A félvezető–elektrolit átmenet fém–félvezető átmenetté alakul át. A napenergia-konverzióra ideális tilossávszélességtartományban is létezhet a fotokorrózió ellenálló anyag. Ilyen félvezetőanyag az eddig alig kutatott kalkogénid típusú  $Cd_4GeSe_6$ . Hosszadalmas előállítási technológiájáért (kémiai gáztranszport, CVT) az elektrokémiai napelemek ideális tulajdonságai kárpótolnak [10].

Az elektrokémiai cella a megoldatlan fotokorrózió miatt sokáig csak tudományos érdekesség maradt. A nagyobb tilossávú félvezetők, mint a  $TiO_2$  ( $E_g = 3,2$  eV) ugyan stabilak a fotokorrózióval szemben, de a napfényre gyakorlatilag átlátszóak, ezért energiahasznosításuk igen csekély. Az áttörést a festékképzésként, a felfedezője után Grätzel-cellának nevezett, konstrukció hozta. Alapja egy optikailag gerjeszthető ruténium alapú festékanyag. Az újfajta konstrukció szerint TCO-val ellátott üvegre visznek fel porózus  $TiO_2$ -t. Erre a nagy felületű nanostruktúrára viszik fel a fényt abszorbeálni képes festéket. Az áramkört jodid alapú elektrolit és az azt befedő szintén TCO-val borított üveg zárja. Az igen nagy felület miatt az abszorpció gyakorlatilag teljes. A teljes réteg csak néhány  $\mu m$  vastagságú. A gerjesztés hatására az elektronok aktiválódnak a festékben. Ez az energiaállapot magasabban van, mint a  $TiO_2$  vezetési sávja. Az elektronok a festék gerjesztett sávjából a  $TiO_2$  vezetési sávjába injektálódnak. Az injektálódásnak gyorsabban kell lezajlania, mint a festékben a rekombinációnak (7. ábra) [4].

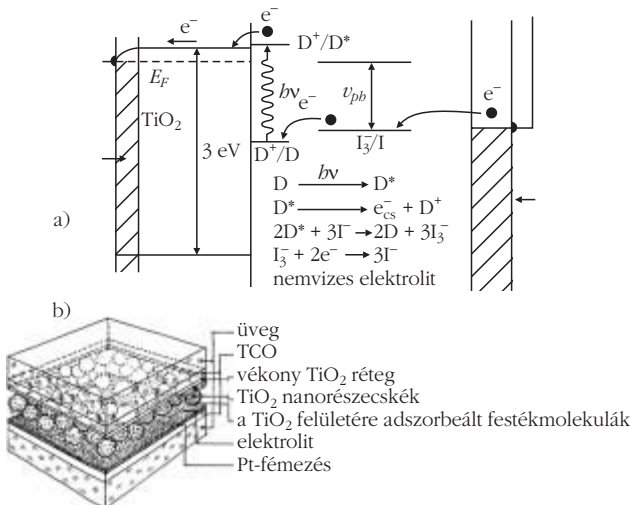
## Vezető polimerek

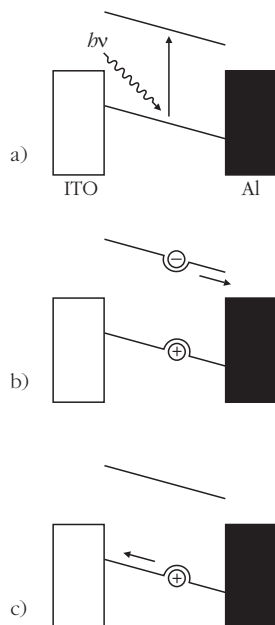
A műanyagok mint szigetelő anyagok élnek a köztudatban. Az elektronika és a mikroelektronika jó szigetelő tulajdonsága miatt használja azokat (pl. tokozásra). A polimeranyagok bizonyos módosítással azonban vezetővé tehetőek. Az ezzel kapcsolatos kutatásokat 2000-ben kémiai Nobel-díjjal jutalmazták.

A vezető polimerek minden bizonnyal forradalmasítani fogják az elektronikát. A konjugált polimerek vezetőképessége igen tág határok között változhat. Szigetelőképességük jobb lehet az üvegénél, elérheti a  $10^{-10}$  S/m-t. De a vezetőképességük vetekehdhet a fémekével is, elérheti a  $10^7$  S/m-t. E polimerekből különféle érzékelőket (gázszenzor, pH-érzékelő), a vezetőképességet kihasználó anti-sztatikus bevonatokat lehet készíteni. Töltéstároló tulajdonságuknak köszönhetően szupernagy kapacitások és akkumulátorok alapanyagaként, félvezető tulajdonságaik miatt pedig különböző elektronikus eszközök (FET-ek, lézerek, kijelzők, napelemek) készítésére használhatóak.

A konjugált polimerek olyan molekulaláncok, melyekben az egyszeres és kétszeres C–C (ritkábban C–N) kötések váltakoznak. Ilyen polimerek a poliacetilén, polifenilén, polipirrol, politiofén, polifenil-vinilén stb. Elterjedésüket az elektronikában és a műszaki élet egyéb területein az is segíti, hogy igen egyszerű eljárással polimerizálhatók, akár vizes oldatból is. A legelterjedtebb, legkézbentarthatóbb eljárás az elektrokémiai polimerizáció. A polimerizálni kívánt monomereket oldatba viszik, majd megfelelő feltételek mellett szelektív dehidrogenizációt hoznak létre.

7. ábra. a) a Grätzel-cella sávábrája, b) a Grätzel-cella felépítése





8. ábra. Töltéshordozó-transzport polimer napelem esetén: a) excitongenerálódás, b) az exciton vándorlása az Al-elektrodához és disszociációja, c) a szabad lyuk vándorlása az ITO-elektrodához.

A leválasztást anódos oxidációval vagy ciklikus voltametriaival végzik. Így az anyag oxidációfoka, azaz tulajdonsága (adalékoltsága) jól szabályozható, továbbá a leválasztott anyagmennyiség (rétegvastagság) meghatározható [11].

A konjugált polimer tulajdonságai adalékolás (dopingolás) hatására drasztikusan megváltoznak. Adalékolása az oxidációs fok változtatásával könnyen megoldható, például az elektródpotenciál változtatásával, redoxivegyületekkel oxidációs állapotukat és vezetőképességüket változtatni lehet. A részleges oxidálás, azaz elektronleadás *p*-adalékolást, a részleges redukálás, azaz elektronfelvétel *n*-adalékolást jelent. Az oxidált forma vezetőképessége a kiindulási anyaghoz képest akár kettőtől 12-es nagyságrendű vezetőképesség növekedést is jelenthet. Az elektronfelvétel, illetve -leadás ionok vagy oldószermolekulák szorpcióját, illetve deszorpcióját jelenti.

Közismert tény, hogy a konjugált polimer vezetése delokalizált  $\pi$ -elektronjaikra vezethető vissza. Ez a kötő pálya ( $\pi$ ), az ennél magasabb energián lévő lazító pálya ( $\pi^*$ ) üres. E két energiaszint közötti távolság 1,4–3 eV között változik. Sok hasonlóságot mutat a félvezetők vegyérték-, vezetési és tilossávjával. A legmagasabb betöltött állapotot HOMO-nak, míg a legalacsonyabb üres szintet LUMO-nak nevezzük. Gerjesztés hatására elektron kerülhet a HOMO-szintről a LUMO-ba. A gerjesztett elektron a delokalizált  $\pi$ -elektronfelhő elektronhiányával Coulombkölcsönhatásba lép. Az együttmozgó töltéspár az exciton. Fotovoltaikus eszközöknél az exciton kötési energiája lehetőleg kicsi kell legyen, míg a fénykibocsátó eszközökben nagy. Az exciton megszűnése fénykibocsátással jár. Az atomok és molekulák szinképénél megismert szinglett és tripllett rendszer az excitonokra is használható.

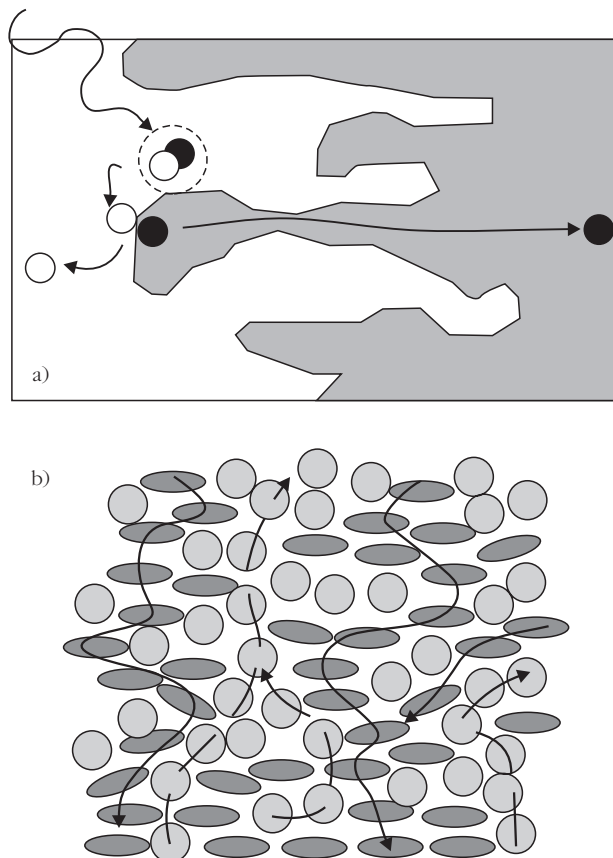
A konjugált polimerfilmeket, ha nem is széleskörűen, de egyes elektronikus berendezésekben egyre gyakrabban használják mint fénykibocsátó eszközt vagy színes kijelzőt. A fénykibocsátó konjugált polimer kommer-

cializálódásának ellenére a sáv szerkezet és a fénykibocsátó exciton működésében máig nincs tudományos egyetértés. A sáv szerkezet kimérésének alapvető módszere a fotoelektron-spektroszkópia, ahol a mért adatok értelmezéséhez elengedhetetlenül fontos lenne az elméleti támogatás. A kiértékeléshez nem használható közvetlenül sem a diszkrét spektrumot adó molekulák szerkezetének kvantumfizikája, sem pedig a folytonos spektrumot adó szilárdtestfizikai leírás. Az értelmezés nehézségeit mi sem bizonyítja jobban, mint az, hogy az exciton kötési energiájára a mérési technikától függően igen jelentős, akár egy nagyságrendi eltérést is kaphatunk. Feniltípusú polimer esetén a fotovezetéssel mért kötési energia 0,1 eV, töltésinjekció módszerrel 0,1–0,2 eV között van az eredmény, STM-mel 0,3–0,4 eV, míg fotoindukált abszorpcióval 0,8–1 eV közötti értékeket kapunk [12].

## Polimer napelemek

Minden valószínűség szerint a jelenleg még kutatási szinten lévő polimer alapú napelemek alapvetően fogják megváltoztatni a napelemes ipart. A polimer alapú napelemek technológiája olcsó és egyszerű, a struktúra szinte bármilyen hordozóra leválasztható. Az eszköz alapvető komponense a konjugált kettőskötéseket tartalmazó polimer. A polimerekben, mint az előzőekben említettük, alapvetően excitonvezetés van, melynek oka a térbeli behatároltság és az alacsony dielektromos állandó. Az exciton disszociáció-

9. ábra. Az abszorpciós úthossz növelésének lehetőségei polimer napelemstruktúrákban: a) tömbi átmenet, b) kevert vagy kompozit átmenet.



ja a határfelületen jön létre, melynek folyamata csak nagy vonásokban ismert [13]. A határfelületen a két különböző anyag elektrokémiai potenciáljának gradiense hatására jön létre a disszociáció és az áram. A donor–akceptor jellegű átmenet létrejöhet két polimer között, de polimer és más félvezető jellegű anyag között is. Az exciton energiája az optikai sávzélesség, mely különbözik az elektromos tilos-sávzélességtől. Az anyagokat úgy kell megválasztani, hogy a heteroátmenet effektív sávzélessége kisebb legyen az exciton energiájánál, hogy az exciton disszociálni tudjon. A polimer abszorpció állandója ( $\alpha$ ) igen nagy, 100 nm-en belül a napsugárzás releváns része abszorbeálódik. Az exciton élettartama nagyon kicsi, diffúziós úthossza ( $L_D$ ) igen rövid, 10 nm nagyságrendbe esik. Látható, hogy a diffúziós úthossz sokkal kisebb, mint a behatolási mélység ( $1/\alpha$ ). Ha túl nagy az aktív réteg ( $d$ ) vastagsága, akkor az excitonok rekombinálnak, mielőtt a határfelületre érnének. Ha nagyon vékony a réteg, akkor az abszorpció gyenge. Az abszorpció hatásfoka  $\eta_A = 1 - e^{-\alpha d}$ , az excitondiffúzió hatásfoka pedig  $\eta_E = e^{-d/L_D}$ . Ha keressük a szorzat szélsőértékét, akkor a számolásból  $d \sim L_D$  méret adódik, melyből igen kis hatásfokú struktúra keletkezne. A feladat az optikai úthossz növelése anélkül, hogy az excitonoknak hosszan kelljen mozogniuk a határfelület eléréséig. A megoldás az igen nagy felületű átmenet az akceptor és donor jellegű anyagok között, mely 1D nanofonalakkal megoldható (*9.a ábra*). Ezt az átmenetet tömbi átmenetnek nevezik. A következő nagy ötlet, hogy a donor jellegű polimerbe akceptor jellegű 0D nanostruktúrákat kevernek (pl.:  $C_{60}$ , CdTe, CdS, CdSe, ZnO,  $TiO_2$ , CIS stb.). A fotogerjesztés hatására a nanokompozitban keletkezett exciton gyorsan talál átmenetet a disszociációhoz (*9.b ábra*). A nanorészecskék alkalmazása esetén a heteroátmenet effektív sávzélessége nemcsak az anyagválasztással, hanem a nanostruktúra változtatásával is hangolható [14].

## Köszönetnyilvánítás

A jelen íráshoz kötődő kutatások egy része az OTKA támogatásával valósulhatott meg (T030426, T037509). Továbbá köszönetemet fejezem ki Gyulai József professzor úrnak a kézírathoz fűzött értékes megjegyzéséért.

## Irodalom

1. NEMCSICS ÁKOS: *A napelem (első rész) Napsugárból elektromos áram* – Természet Világa 134/9 (2003) 424–426
2. J.J. WYSOCKI, P. RAPPAPORT: *Effect of Temperature on Photovoltaic Solar Energy Conversion* – J. Applied Physics 31 (1961) 571–578
3. NEMCSICS ÁKOS: *A napelem (második rész) Paradigmaváltás a technológiában* – Természet Világa 135/9 (2004) 420–422
4. NEMCSICS ÁKOS: *A napelemek és fejlesztési perspektívái* – Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.
5. M. SERÉNYI, J. BETKO, Á. NEMCSICS, N.Q. KHANH, M. MORVIC: *Fabrication of a-SiGe Structure by Magnetron Sputtering for Solar Cell Purposes* – Phys. Stat. Sol. (c) 0 (2003) 857–861
6. M. SERÉNYI, J. BETKO, Á. NEMCSICS, N.Q. KHANH, D.K. BASA, M. MORVIC: *Study on the RF sputtered hydrogenated amorphous silicon-germanium thin films* – Microelectronics Reliability 45 (2005) 1252–1256
7. Á. NEMCSICS: *Growth information carried by Reflection High-Energy Electron Diffraction* – Quantum Dots: Fundamentals, Applications, and Frontiers (eds. B.A. Joyce et al.) Springer, Dordrecht (2005) 221–237
8. Á. NEMCSICS: *Explanation of the initial phase change vs. incident angle of the RHEED intensity oscillation* – Thin Solid Films 412 (2002) 60–63
9. Á. NEMCSICS: *Valuing of the critical layer thickness from the dead-time constant of RHEED oscillation in the case of InGaAs/GaAs heterojunction* – Applied Surface Science 190 (2002) 294–297
10. Á. NEMCSICS, I. KOVÁCS, Z. LÁBADI, K.-F. HESSE, M. CZANK, P. TURMEZEI, S. MOTRYA: *Novel material for purpose of electrochemical solar cell* – Solar Energy Materials and Solar Cells 89 (2005) 175–183
11. INZELT GYÖRGY: *Kalandozások a kémia múltjában és jelenében* – Vince Kiadó, Budapest, 2003.
12. N. KIROVA, S. BARZOVSKI: *Electronic interactions and excitons in conducting polymers* – Curr. Appl. Phys. 4 (2004) 473–478
13. F.C. KREBS ET AL.: *Lifetimes of organic photovoltaics* – Solar Energy Materials and Solar Cells 86 (2005) 499–516
14. S.R. FORREST: *The Limit to Organic Photovoltaic Cell Efficiency* – MRS Bulletin 30 (2005) 28–32

# BELSŐ SUGÁRTERHELÉS MEGHATÁROZÁSA EGÉSZTESTSZÁMLÁLÁSSAL

Andrási Andor  
KFKI Atomenergiakutató Intézet

A radioaktív izotópoktól származó sugárterhelésnél megkülönböztetnek külső és belső dózist aszerint, hogy a sugárforrás az emberi testen kívül helyezkedik el, vagy valamilyen úton (belégzéssel, lenyeléssel stb.) már bekerült az emberi szervezetbe. A belső sugárterhelés meghatározása bonyolultabb művelet, mint a külsőé, hiszen a sugárzó anyag részt vesz az anyagcsere-folyamatokban, és a kémiai-fizikai tulajdonságainak megfelelően oszlik el, tartózkodik ott, illetve távozik onnan. Ez esetben a közvetlen mérés – amint az a külső forrásnál történik – rendszerint nem kivitelezhető, a dózis meghatározását az emberi szervek, szövetek vagy akár az egész test aktivitásának idő szerinti méréséből, majd számításokkal, modellezéssel lehet elvégezni.

## A belső sugárterhelés jellemző mennyiségei

Az emberi szervezetbe került radioaktív anyag sugárzása folyamatosan éri az emberi testet. Ezért a nGy/s, nSv/s, nSv/h stb. egységben mérhető dózisteljesítmény helyett – a szervezetbe került radionuklid felezési idejétől és anyagcserejéértől függően – a rövidebb-hosszabb időtartamra, rendszerint évekre összegzett dózisteljesítményt használjuk a belső sugárterhelés jellemzésére.

## A lekötött dózis

A belső sugárterhelés időben összegzett, integrált dózisteljesítményét lekötött dózisként nevezzük, és egy adott  $T$

szövet, szerv esetén az egyenérték-dózis kvantitatív formában a következőképpen írható:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \dot{H}_T(t) dt,$$

ahol  $t_0$  az izotóp bekerülésének időpontja, az integrandus a  $T$  testszövetet, szervet ért egyenérték-dózisteljesítményt jelöli a  $t$  idő függvényében,  $\tau$  pedig az időintervallumot, amelyre az integrálás történik. A sugárvédelemben az integrálási időtartamot – hacsak valami másként nem indokolja – felnőttek esetében 50 évre, gyermekeknél pedig 70 évre (várható életkorra) javasolják megválasztani.

Az egész szervezetre vonatkozó lekötött effektív dózist az egyes szervek, szövetek lekötött egyenérték-dózisainak súlyozott összegzéséből kapjuk, azaz

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau),$$

ahol  $w_T$  a testszöveti súlytényező, amely a  $T$  testszövetnek a teljes ártalomban való járulékos arányát fejezi ki.  $E(\tau)$  a lekötött effektív dózis (egysége: Sv), mely a belső sugárterhelés meghatározása szempontjából alapvetően fontos mennyiség, mert a dóziskorlátozási rendszere is ezt tekinti a belső sugárterhelés esetében a korlátozás alapjaként.

### Forrásszerv–célszerv

A kérdéses  $T$  testszövetet ért  $H_T(\tau)$  lekötött egyenérték-dózis meghatározása során két fő tényezőt kell figyelembe venni. Az egyik a lekötött egyenérték-dózisteljesítmény időfüggéséből adódik, mely a testszövetben jelenlevő radioizotóp aktivitásának a biokinetikai folyamatok és a fizikai bomlás következtében előálló időbeli változását jellemzi. Az időben változó aktivitás közvetlen méréssel, például egészsztesztzámlálással meghatározható. A fentiekből következik, hogy az aktivitás időintegrálja megadja az integrálási idő alatt a  $T$  szervben bekövetkezett összes bomlások számát. A lekötött egyenérték-dózisteljesítmény másik, időtől független része az egy radioaktív bomlásból származó sugárzás energiájának az adott testszövetben történő elnyelődésére utal.

Az elmondottak kiterjeszthetők az  $E(\tau)$  lekötött effektív dózisra is, csak akkor figyelembe kell venni a többi testszövetben az izotóp biokinetikáját, valamint az egyes testszövetek aktivitásaitól származó sugárzások elnyelődését a saját és áthatoló (elsősorban  $\gamma$ ) sugárzások esetében a többi testszövetben is.

Megkülönböztetve az  $S$  forrásszervet a  $T$  célszerv testszövettől, 50 éves integrálási időt feltételezve a lekötött effektív dózis ( $E_{50}$ ) egy adott izotópra a következő kifejezéssel adható meg

$$E_{50} = \sum_T w_T \sum_S U_S \sum_i \frac{Y_i \epsilon_i AF(T \leftarrow S)_i w_{R,i}}{M_T},$$

ahol

$$U_S = \int_{t=0}^{50} q_S(t) dt$$

az  $S$  forrásszervben a kérdéses izotóp 50 év alatti összes bomlásainak száma,  $q_S(t)$  az  $S$  forrásszervben a kérdéses izotóp aktivitása a  $t$  idő függvényében,  $Y_i$  az izotóp  $i$ -edik sugárzásának bomlásonkénti gyakorisága,  $\epsilon_i$  az izotóp  $i$ -edik sugárzásának energiája,  $AF(T \leftarrow S)_i$  az  $S$  forrásszervből kiinduló  $i$ -edik sugárzás energiaelnyelési hányadát jelenti a  $T$  céltárgyszervben ( $T$ -ben elnyelt energia osztva  $S$ -ben emittált energia) és  $M_T$  a céltárgyszerv tömege.

A lekötött effektív dózis fenti kifejezésében szereplő utolsó összegzést fajlagos effektív energiának szokták nevezni és  $SEE(T \leftarrow S)_i$  szimbólummal jelölni. Ezt a mennyiséget, amely egy adott izotóp egy bomlására vonatkoztatva a céltárgyszerv tömegegységében elnyelt energia nagyságára jellemző, táblázatokban adják meg. Ha az  $\epsilon_i$  energiát MeV-ben és az  $M_T$  tömeget grammban adjuk meg, akkor egy  $1,6 \cdot 10^{-10}$ -es átszámítási tényező segítségével az  $E_{50}$  lekötött effektív dózist a fenti kifejezés alapján sievertben (Sv) kapjuk meg.

Ez az eljárás és technika terjedt el a nukleáris orvostudományban az Amerikában kidolgozott MIRD-módszer (Medical Internal Radiation Dose) néven.

### Izotópfelvétel és dózistényező

Felvételnek hívjuk a radioizotópok emberi szervezetbe jutásának folyamatát belégzés, lenyelés útján, vagy akár a bőrön keresztül. A felvett radionuklid és annak aktivitása fontos szerepet játszik a jelenleg érvényes dóziskorlátozási rendszerben. A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (International Commission on Radiological Protection, röviden ICRP) célszerűnek látta, hogy a dóziskorlátozási rendszer elemeként bevezesse, és a belső sugárterhelés meghatározása szempontjából fontos szerepet adjon a dózistényezőnek, amely az egységnyi felvétel következtében előálló lekötött effektív dózist adja meg, azaz

$$e(\tau) = \frac{E(\tau)}{I}.$$

ahol  $I$  a felvett aktivitás (Bq) és  $e(\tau)$  a dózistényező, melynek értéke természetesen függ az integrálási időtől és specifikus a radioizotópra, annak fizikai és kémiai tulajdonságaira, valamint az izotóp testbe kerülésének út-vonalára (belégzés, lenyelés, vagy bőrön keresztüli felvétel). Gyermekek esetében az életkort is figyelembe kell venni, ugyanis az anyagcsere, az egyes izotópok biokinetikája korfüggő. A definícióból következik, hogy a dózistényező egysége Sv/Bq, amelynek értékeit a Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság a különböző esetekre kiszámolva táblázatok formájában teszi közzé.

A dózistényező meghatározása lényegében a lekötött effektív dózis számítását jelenti, mely során figyelembe veszik a radioizotóp szervezetbe jutásának, majd a szervezeten belüli transzportfolyamatoknak sokrekeszes modellel történő leírását. A transzport, az anyagcsere, a beépülés és kiválasztás lehetséges útjaira és sebességére jellemző paramétereket általában egy átlagos, az úgynevezett referenciaemberre vonatkoztatják.

A másik tényező a fizikai dózis meghatározására vonatkozik, amely számításba veszi a sugárzás terjedését és elnyelődését minden egyes szövetben, az emberi anató-

miai viszonyokat, a forrás- és céltárgyszervek méretét, alakját, egymáshoz viszonyított távolságait, az emittált sugárzás fajtáját, energiáját és a hozamot, valamint a céltárgyszerv tömegét a tömegegységre jutó elnyelt energia, a dózis meghatározása céljából.

Az elmondottak szerint a dózistényezők ismeretében a belső sugárterhelés meghatározása leegyszerűsödik a felvétel értékének meghatározására, amely azonban a legtöbb esetben közvetlenül nem mérhető. A gyakorlatban az egészsztestszámlálóval végzett mérésekkel egy adott szervben, vagy az emberi test egészében lévő radioaktív izotóp aktivitását határozzuk meg egy, a testen kívül elhelyezett detektorral. Ha ez nem lehetséges (pl. tisztán  $\beta$ -sugárzó izotópok esetén), akkor közvetett méréssel, az emberi exkréció (pl. ürített vizelet, vagy széklet) aktivitásából, esetleg az ember tartózkodási helyén mért levegő, vagy akár a fogyasztott élelmiszer aktivitáskoncentrációjából kinetikai modellek segítségével közvetve következtünk a testen lévő radioizotóp mennyiségére, és ezen keresztül a felvétel nagyságára.

A belső sugárterhelés meghatározása egyszerűnek tűnhet, de ez csak a tett feltevések miatt van így. Feltételeztük, hogy a mérésre kerülő személy biokinetikáját és egyéb fizikai jellemzőit a referenciaemberre elvégzett modellszámítások jól leírják. Ezt az egyszerűsítést azonban nem mindig tehetjük meg. Ugyancsak feltételeztük, hogy a felvétel ismert és egy bizonyos időpontban következett be, nem számolva azzal, hogy a felvétel időpontja gyakran ismeretlen, és lehet, hogy többször megismétlődő vagy időben elhúzódó (krónikus) felvétellel állunk szemben. Előfordulhat az is, hogy egyszerre több izotóp jelenlétével kell számolni. Feltételezésekkel kell élni az izotóp és hordozója fizikai és kémiai tulajdonságait illetően is, nem beszélve a radioizotóp szervezetbe kerülésének útjáról.

Mindaddig, amíg a várható sugárterhelés nem éri el azt a szintet, amely felett sugárvédelmi szempontból indokolt már a személyes jellemzők és a felvétel körülményeinek részletes ismerete, a referenciaeljárás elfogadhatónak tekinthető. Bonyolultabb esetekben a belső sugárterhelés meghatározásához különböző számítógépi kódok állnak rendelkezésre, amelyekkel az adott esetre legjobban illő feltételeket lehet figyelembe venni.

## Az egészsztestszámlálás technikája

Az egészsztestszámláló az emberi szervezeten kívül elhelyezett detektorral az ember szervezetében jelenlévő radioizotóp minőségét és mennyiségét (aktivitását) közvetlenül méri. Természetesen ilyen berendezéssel egy izotóp csak akkor mérhető, ha az általa kibocsátott sugárzás kellő mértékben áthatoló ahhoz, hogy az emberi testen kívül elhelyezett detektor érzékelni tudja. Ilyen a karakterisztikus röntgen- és gammasugárzás bizonyos energiatartományban (általában 10–3000 keV), valamint a nagyobb energiájú béta-sugárzás által kiváltott fékezési röntgensugárzás.

Mérőeszközként olyan detektort célszerű alkalmazni, amely alkalmas mind a sugárzás energiájának, mind pedig a kibocsátott fotonok számának meghatározására.

Míg az előző az izotóp azonosítását, az utóbbi az izotóp aktivitásának meghatározását teszi lehetővé. A mérőberendezés tehát lényegében egy gammaspektrométer azzal a különlegességgel, hogy a mérendő minta az emberi test. Figyelembe véve ezt a tényt és azt, hogy a detektor a radioizotóp bomlása során keletkező fotonoknak csak bizonyos hányadát méri – tehát relatív mérésről van szó – a kalibrálásnak döntő szerepe van. Az egészsztestszámlálás szó arra utal, hogy a mérési geometria megválasztásánál alapvető szempont, hogy a detektor jelzése, amennyire csak lehet, független legyen a sugárforrásnak a testen belüli helyétől és eloszlásától. Adott esetben szükség lehet ennek éppen a fordítottjára is, nevezetesen a forrás helyének vagy a testen belüli eloszlásának ismeretére, ami megfelelő mérési geometria alkalmazásával megvalósítható. A mérési feladat általában indokolja, hogy az ember szervezetében már kis mennyiségű radioaktív anyag jelenlétét ki tudjuk mutatni. Ezért az ilyen típusú mérések jellegzetessége, hogy az alsó kimutatási határ csökkentésére törekszik a mérés érzékenységének növelésével és a háttérsugárzás zavaró hatásának csökkentésével.

## Mérési követelmények

Az izotópozonosítás és -elválasztás az egészsztestszámlálásnál is elsősorban a nagy energia-felbontóképességgel rendelkező félvezető gamma-spektrometria révén lehetséges. Ennek különös jelentősége van olyan esetekben, amikor uránhasadási és felaktiválási termékeket tartalmazó keverék meghatározásáról van szó.

A mérő-értékelő rendszer érzékenységének elég nagy-nak kell lennie ahhoz, hogy figyelembe véve a mérési időt, a valószínűen várható izotópokra vonatkozóan a legkisebb kimutatható aktivitás és az izotóp felvételi időpontjának reális feltételezése mellett tegye lehetővé a nemzetközi ajánlásokban és a hazai szabályzásban szereplő aktivitási szintek biztonságos meghatározását. Ugyanis egy átlagos ember körülbelül 10 percet még viszonylag türelmesen tölt egy mérőeszköz alatt (miközben zenét hallgat, esetleg mikrofonon keresztül társalog stb.), ennél hosszabb idő után azonban már mozogni kezd, s az elmozdulás növeli a geometriából eredő mérési hibát.

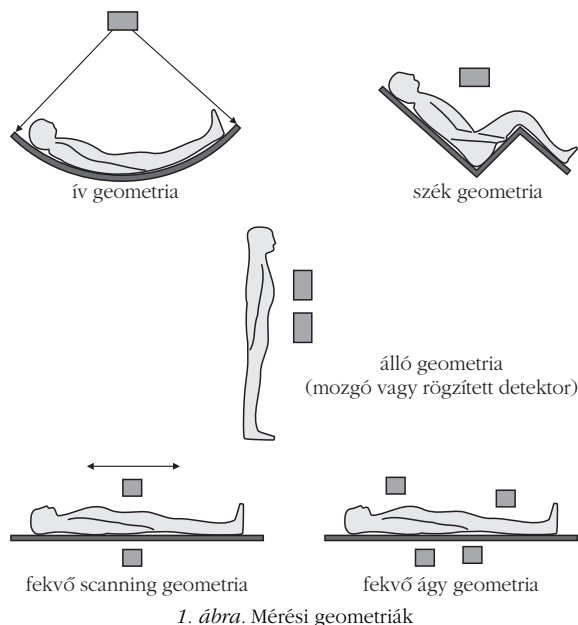
Az általános követelmények, mint például a megbízhatóság, a stabilitás és reprodukálhatóság természetesen itt is lényegesek. Szcintillációs detektorok esetén az időben változó hőmérséklet megváltoztathatja az energiakalibrációt, így megnehezíti az izotópozonosítást, és befolyásolhatja az aktivitászámítás eredményét. Ugyancsak problémát okozhat a környezeti háttér intenzitásában és spektrumalakjában megmutató időbeni ingadozás is. A Ge alapú félvezető detektorok esetén ezek a problémák gyakorlatilag nem jelentkeznek, mert az energiakalibráció időben stabilnak tekinthető, és a jó energiafelbontás miatt a háttérspektrumban bekövetkező esetleges változás nem zavarja a spektrum kiértékelését. Általában arra törekszünk, hogy a relatív hiba legyen minimális, amely a számlálási statisztikán kívül mindenekelőtt a mérési geometria reprodukálhatóságától függ.

## Mérési geometria

A mérési geometria a mérendő személy és a mérő detektor egymáshoz képesti elhelyezkedését adja meg. A legalkalmasabb mérési geometria megválasztása során a mérési feladat határozza meg, hogy a detektor jelzése a testen belüli radioaktív forrás helyétől és eloszlásától függő, vagy éppen ellenkezőleg minél függetlenebb legyen. Minden esetben fontos szempontként kell kezelni, hogy a mérendő személy a mérés közben kényelmes és nyugodt testhelyzetben tudjon maradni.

Amennyiben a mérés arra irányul, hogy nem az egész testben, hanem annak valamelyik szervében található radioizotóp mennyiségét kell meghatározni, akkor a mérő detektort vagy detektorokat úgy kell elhelyezni, hogy kellő érzékenység mellett a más szervből jövő fotonok a mérést lehetőleg ne zavarják. Adott esetben a detektor megfelelő árnyékolásával és kollimátor elhelyezésével ez a szempont jobban megvalósítható. Ilyen, szervre irányuló tipikus mérési feladat a tüdőben, vagy a pajzsmirigyben lerakódott izotópok meghatározása, de ide sorolható csontkereső izotópok esetében a koponya, vagy a térdizület aktivitásának mérése is. Nagyobb mennyiségű izotóp jelenléte esetében a feladat úgy is megvalósítható, hogy egy vagy több detektort kollimátorral ellátva mozgatunk a test felett, és a helyfüggő fotonintenzitás-eloszlásból következtetünk az egyes szervekben található izotóp mennyiségére. Természetesen ugyanez a helyzet, ha a detektor áll, és a mérendő személyt mozgatják hozzá képest. Az ilyen mozgó rendszerekkel végzett méréseket nevezzük profil, vagy kétdimenziós mozgás esetén rektilineáris scanning eljárásnak.

A hagyományos értelemben vett egészszestszámlálásra az a törekvés jellemző, hogy a detektor jelzése nagy érzékenység mellett minél kevésbé függjön a radioizotóp testen belüli helyétől és eloszlásától. Nyilvánvaló, hogy ez a törekvés leginkább akkor tud teljesülni, ha nagy számú vagy méretű detektorral vesszük körül a mérendő személyt akár  $2\pi$  vagy  $4\pi$  jelleggel. Ennek azonban a költség- és műszakimegoldás-vonzata olyan mértékű, amelyet a szakmai szempontok csak különleges esetben indokolnak. Kellően jó mérési határfok biztosításával egy vagy csak kis számú detektor is már a pontossági feltételeknek eleget tevő eredményre tud vezetni. Az egészszestszámlálók döntő többsége az utóbbi mérési geometriát



1. ábra. Mérési geometriák

alkalmazza az 1. ábrán bemutatott, vagy ahhoz hasonló detektor–személy elrendezések mellett.

Néhány mérési geometria jellemző tulajdonságát foglalja össze az 1. táblázat.

## Detektorok, elektronika és jelfeldolgozás

A NaI(Tl) szcintillációs detektorokat régóta elterjedten alkalmazzák nagy hatásfokú gamma-spektrometria céljára. Közepes energiafelbontó-képességük miatt az izotópok egymás melletti meghatározása segítségükkel csak egyszerűbb spektrumok esetén lehetséges. A fotoelektron-sokszorozó hőmérsékletfüggése ronthatja az energiakalibráció stabilitását, azonban előnye, hogy a detektor szobahőmérsékleten is üzemeltethető. Kisenergiás fotonok mérésére használják még az úgynevezett phoswich detektorokat, amelyek különböző méretű, talliummal aktivált nátrium és céziumjodid kristályok kombinációi (NaI(Tl)+CsI(Tl)). Előnyük, hogy elektronikus jelalakdiszkriminációval a zavaró háttér csökkenteni lehet. A szerves kristállyal működő szcintillációs detektorok előnye, hogy szinte akármilyen nagy méretben elő lehet őket állítani, tehát nagyon nagy hatásfokú mérést tesznek lehetővé. Igen rossz energiafelbontó-képességük miatt azonban egészszestszámlálásra manapság gyakorlatilag már nem használják ezeket.

Egyre elterjedtebben alkalmazzák a félvezető alapú detektorokat, mindenekelőtt a rendkívül jó energiafelbontó-képességük miatt. Jóllehet nagy méretű detektorok előállítására technológiai nehézségekbe ütközik, és ennek megfelelően a költségük is igen magas, mégis a jó energiafelbontásuk és kis hátte-

Néhány egészszestszámlálós mérési geometria összehasonlító táblázata					1. táblázat
geometria	mechanikus elrendezés	detektorjelzés-egyenletesség	forráseloszlás-érzékenység	mérési határfok	$^{137}\text{Cs}$ kimutatási határ (Bq)
ív	rögzített	nagyon jó	nincs	kicsi	300
szék	rögzített	gyenge	nincs	nagy	100
álló	rögzített	jó	lehetséges	nagy	70
scanning	mozgó detektor/ ágy	jó	van	nagy	100
árnyékolt detektor	rögzített/ mozgó	közepes	van	közepes	130



rük következtében a velük elérhető legkisebb kimutatható aktivitás megközelíti a szcintillációs detektorokét, különösen összetett gammaspektrumok esetében. Általános egészsztesztzámlálás céljára a széles energiatartományt átfogó, nagy tisztaságú germánium detektorokat (HPGe), vagy egyes szervek mérésénél a kisenergiás fotonok meghatározásánál lítiummal driftelt szilícium planár-detektorokat alkalmaznak. Ezeknek hátránya, hogy csak a folyékony nitrogén alacsony hőmérsékletén üzemeltethetők. Újabban speciális célokra, mint például radioaktív anyaggal szennyezett seb mérésére előnyösen alkalmazhatóak a csak kis méretben előállítható tiszta szilícium vagy kadmiumtellurid (CdTe) detektorok, amelyek hűtés nélkül szobahőmérsékleten is működnek. Ezek mozaikszerű elrendezésben nagyobb méretben is alkalmazásra kerülhetnek a jövőben.

Az egészsztesztzámlálásnál alkalmazott elektronika alapvetően megegyezik egy szokásos gamma-spektrometriai mérésnél használt egységgel, mint például nagyfeszültségű tápegység, elő- és főerősítő, analóg-digitál konverter (ADC), amplitúdóanalizátor. Manapság már jószerével az összes funkciót számítógéppel egybeépített elektronika látja el. Bizonyos geometriai elrendezéseknél (pl. scanning geometria) a mérés mellett az elektronika biztosítja a mozgásvezérlést is. A mért gammaspektrumok kiértékelését, nevezetesen az izotópazonosítást és aktivitásmeghatározást megfelelő számítógépes szoftverek végzik.

## Árnyékolás

A mérőrendszert körülvevő árnyékolás célja, hogy csökkentse a kozmikus sugárzás és a mérőhely környezetének természetes és mesterséges izotóptartalmától származó háttérsugárzás zavaró hatását. Árnyékoló anyagoknak magas rendszámú és nagy sűrűségű anyagok alkalmasak, amelyek hatásosan gyengítik a gammafotonok intenzitását. Ilyen anyagok a vas vagy acél és az ólom. Kétféle árnyékolási típust lehet megkülönböztetni: az egyik olyan, hogy teljesen körülveszi a detektort és a mérendő személyt, a másik típus pedig csak részlegesen veszi körül vagy csak a detektort, vagy a detektort és a mérendő személyt úgy, hogy csak szórt sugárzás érheti a detektort, direkt sugárnyaláb nem. A teljesen zárt árnyékolást kell alkalmazni minden olyan esetben, amikor kis energiájú sugárzás (10–100 keV) nagy érzékenységgel meghatározása a cél. Ilyen például a transzurán elemek izotópjainak jelentős része. Ennél a mérési feladatnál nem elegendő az egyrétegű masszív árnyékolás (pl. 10–20 cm vas), hanem további belső rétegek szükségesek az egyre csökkenő energiájú másodlagos sugárzások elnyelése érdekében (pl. ólom, réz, kadmium vagy ón).

## Kalibráció

Tekintve, hogy minden egészsztesztzámlálós mérésnél relatív mérésről van szó, a kalibráció az aktivitás meghatározásának talán a leglényegesebb része. Leggyakrabban az emberi testet geometriailag és anyagösszetétel szerint utánpótló fantomokat használnak, bennük az adott aktivitáseloszlást kell tudni megfelelően szimulálni. A test saját elnyelése miatt különösen a kis energiájú fotonok mérésénél

kell pontosan utánozni a valóságos méreteket és eloszlást a fantomokban. Különösen a tüdőben lerakódott  $^{239}\text{Pu}$ , vagy  $^{241}\text{Am}$  izotópok mérése igényel gondos kivitelezést, kalibrálást, antropomorf mellkasfantom használatot, benne a lágy szövetek és a csontok megfelelő eloszlásával.

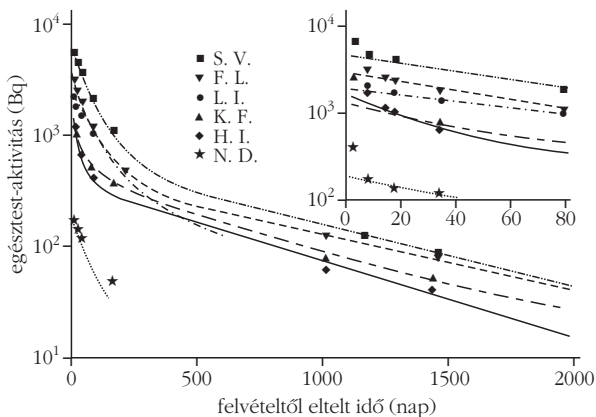
Nagyobb fotonenergiáknál, mint például  $^{137}\text{Cs}$  esetén, és amikor a szervezeten belüli izotópeloszlás jó közelítéssel egyenletesnek feltételezhető, a kalibráció során elegendő az emberi test alakját csak durván közelítő műanyag edényekből összeállított fantomalakzattal közelíteni. Ilyenkor a testszövet anyagának és az egyenletesnek feltételezett forráseloszlásnak szimulációjaként az izotóp egyszerű vizes oldata is megfelelő.

A számítástechnika és az orvosi háromdimenziós digitális képalkotás fejlődésének köszönhetően manapság már arra is van lehetőség, hogy ha a sugárvédelmi szempontok azt indokolják, az adott személyről először komputer tomográffal (CT) vagy mágneses rezonancia felvétellel (MRI) készült kép alapján modellezik az emberi testet, néhány mm élhosszúságú mérési geometriát és a feltételezett izotópeloszlást, majd Monte-Carlo fotontranszport kód segítségével számítják ki a mérési határfokot. Ezzel a módszerrel könnyen lehet szimulálni különböző körülményeket, így például optimalizálni lehet a mérési geometriát különböző feltételezett izotópeloszlásokra, vagy össze lehet hasonlítani a különböző méretű és alakú fantomokat a határfok-kalibráció jóságának ellenőrzésére. A módszer leginkább a kis energiájú fotonok méréstechnikájánál jelent nagy segítséget. Természetesen ezt az eljárást csak jól felkészült laboratóriumban lehet elvégezni, ahol mind a technikai, mind pedig a személyi feltételek adottak.

## Egésztesztzámlálás Magyarországon

Az ember szervezetébe került radioaktív anyag meghatározására az első próbálkozások a huszadik század 20-as éveiben történtek, amikor is a rádiumos lumineszkáló festékkel dolgozó nők szervezetébe jutott meglehetősen nagy mennyiségű sugárzó anyagot a testből kilépő áthatoló gammasugárzás detektálásával kívánták meghatározni. Kezdetben ionizációs kamrát, majd GM-csőves detektorokat használtak különösebb árnyékolás nélkül. A legkisebb kimutatható Ra-mennyiség 50–100  $\mu\text{g}$  volt, mely 3–4 MBq egyensúlyi aktivitásnak felel meg. A szcintillációs detektorok megjelenésével, a méréstechnika fejlődésével az 1950-es években már 0,001  $\mu\text{g}$  rádium is kimutathatóvá vált. A fejlesztéseket ekkor már az atomenergia igénye, a hasadvány- és korróziós termékek meghatározása determinálta. Az 1980-as évektől kezdődően egyre inkább elterjedt a félvezető alapú detektorok alkalmazása a kis és a nagy energiájú fotonok tartományában egyaránt, és a technika iránti igény különösen az orvosi izotóppalkalmazásoknál nőtt mind a dolgozók, mind a páciensek mérésével.

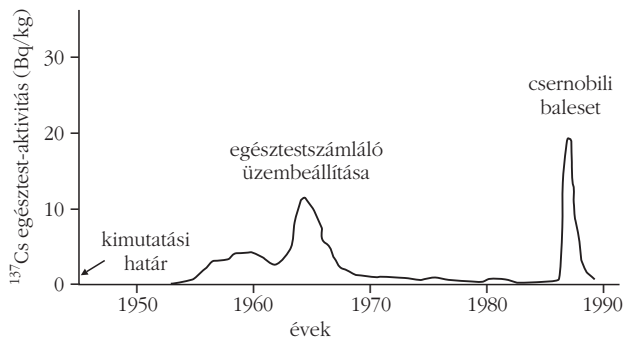
Az 1950–60-as években a radioaktív izotópok alkalmazásának elterjedése a kutatás, az ipar és egészségügy területein, a hazai atomreaktor létesítése és a hozzá kapcsolódó izotóppgyártási tevékenység, valamint az uránbá-



2. ábra. A Co-60 aktivitásának csökkenése egészsztesztben néhány, a KFKI-ban az 1980-as években akut módon szennyeződött felnőtt esetén.

nyászat felfutása mind szükségessé tették hazánkban is az emberi szervezetbe került radioizotópok sugárvédelmi szempontból történő meghatározását, és a belső dózisterhelés becslését. Magyarországon 1964-ben épült az első kis méretű egészsztesztzámmláló az Országos Onkológiai Intézetben az egészségügyi személyzet sugárvédelmi ellenőrzése céljából. A kezdetben plasztik szcintillátorral működő rendszer elektronikáját és detektorát a jobb felbontás érdekében később továbbfejlesztették. A berendezést kisebb-nagyobb kihagyásokkal mindmáig használják, jelenleg korlátozott mértékben, mindenekelőtt orvosi kutatási célú alkalmazásokhoz.

Ugyancsak 1964-ben helyezték üzembe a Központi Fizikai Kutatóintézet nagy méretű egészsztesztzámmlálóját, amely részint belső sugárterhelés kockázatának kitétt intézeti dolgozók ellenőrzésére, részint kutatási feladatokra és országosan felmerülő mérési igények kielégítésére épült. A mérő-értékelő rendszer az elmúlt több mint négy évtized során számos továbbfejlesztési fázison ment keresztül. Ezek során a megvalósítható mérési elrendezések, beleértve az aktivitáseloszlás mérését is, az alkalmazott detektorok és a rendelkezésre álló mérésvezérlő és



3. ábra. A Cs-137 radionuklid megjelenése a fővárosi lakosságban.

adatfeldolgozó elektronika szempontjából az ország leg-sokrétűbben használható egészsztesztzámmlójává vált. Az elmúlt évtizedekben több ezer ellenőrző mérést végeztek vele, amelyek során többször is észleltek inkorporációs eseményhez kötött izotópfelvételt (2. ábra). A leggyakrabban előforduló izotópok  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  és  $^{192}\text{Ir}$  voltak. A hazai lakosság mesterséges izotóptól származó belső sugárterhelésének meghatározása érdekében széleskörű vizsgálatok folytak 1964 után az atomfegyver-kísérletek, majd 1986 után a csernobili baleset következményeinek felmérésére (3. ábra).

Az Országos Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutatóintézetben 1981-ben üzembe helyeztek egy székárnycolt detektor típusú mérőberendezést, amelyet az ország különböző munkahelyein dolgozók belső sugárterhelésének mérésére több éven át használtak. 1990-ben felépült egy saját tervezésű, korszerű scannelő mérőberendezés, amely jelenleg a kutatások mellett elsősorban hatósági sugárvédelmi, sugáregészségügyi feladatokat lát el. Ennek keretében többek között vizsgálták a Paksi Atomerőműben az 1990-es évek végén előfordult inkorporációs eseményben érintett dolgozók  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  és  $^{54}\text{Mn}$  izotóptól származó belső sugárterhelését. A csernobili reaktorbalesetet követően az egészsztesztzámmláló mérési eredményeik fontos részét képezték a hazai la-

2. táblázat

**A hazai egészsztesztzámmlók jellemzői**

intézmény	üzemeltetés éve	árnyékolás	detektor	geometria	alkalmazás
Onkológia	1964–	kis méretű zárt	1 db NaI(Tl)	szék	<ul style="list-style-type: none"> <li>baleseti készenlét</li> <li>orvosi kutatás</li> <li>személyzet sugárvédelme</li> </ul>
KFKI-AEKI	1964–	nagy méretű zárt	2 db NaI(Tl) 1 db HpGe	<ul style="list-style-type: none"> <li>scanning</li> <li>szék</li> <li>ív</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>foglalkozási sugárvédelem</li> <li>kutatás</li> <li>orvosi alkalmazás</li> <li>baleseti alkalmazás</li> </ul>
MÉV	1966–81	(1) részlegesen nyitott (2) alagút	(1) 1 db NaI(Tl) (2) 1 db NaI(Tl)	(1) szék (2) ágy	<ul style="list-style-type: none"> <li>uránbányászok radonterhelése</li> </ul>
OSSKI	1981–	(1) részleges (2) nagy méretű zárt	(1) 2 db NaI(Tl) (2) 2 db HpGe	(1) szék (2) scanning	<ul style="list-style-type: none"> <li>foglalkozási sugárvédelem</li> <li>kutatás</li> <li>baleseti alkalmazás</li> </ul>
PART	1982–	(1) nyitott (2) részlegesen nyitott (3) részlegesen nyitott	(1) 1 db NaI(Tl) (2) 1 db NaI(Tl) (3) 2 db HpGe	(1) ív-szék (2) szék (3) scanning	<ul style="list-style-type: none"> <li>személyzet sugárvédelme</li> </ul>
BME NTI	1997–	részlegesen nyitott	1 db NaI(Tl)	ív-szék	<ul style="list-style-type: none"> <li>oktatás</li> </ul>

# AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT ÜGYRENDJE

A jelen ügyrend célja, hogy az Eötvös Loránd Fizikai Társulat (a továbbiakban: Társulat) Alapszabályában (a továbbiakban: Asz.) foglaltak érvényre juttatásához szükséges, részletes szabályokat rögzítse, továbbá hogy a Társulat folyamatos, általános működésének rendjét – amennyiben az érintett kérdéssel az Asz. nem foglalkozik – az Asz. alapvető rendelkezéseivel összhangban szabályozza.

## 1. A Társulat érmei és díjai (Asz. 6. §)

**1.1.** A Társulat az Asz. rendelkezéseivel és a Küldöttközgyűlés korábbi határozataival összhangban az alábbi érmeket és díjakat adományozhatja.

**1.1.1.** Az *Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érme* (Asz. 6. § a) pontja) adományozható a Társulat azon tagjának, aki a fizika területén, hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységével, valamint a Társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedő mértékben járult hozzá a hazai fizika fejlődéséhez. A Társulat e legnagyobb kitüntetéséből évente legfeljebb egy adományozható, odaítélésére az Elnökség tesz javaslatot a Küldöttközgyűlés felé.

**1.1.2.** A *Fizikai gondolkodás terjesztéséért* elnevezésű érem (más néven Prométheusz-érem, Asz. 6. § b) pontja) adományozható annak, aki a fizikai műveltség terjesztéséhez országos hatással járult hozzá. Az érem évente legfeljebb egy személynek adományozható, odaítélésére az Elnökség tesz javaslatot a Küldöttközgyűlés felé.

**1.1.3.** *Eötvös Plakett* elnevezésű emléktárgy (Asz. 6. § c) pontja) adományozható

– annak a társulati tagnak, aki hosszú időn keresztül aktív társadalmi munkával járul hozzá a Társulat egészének vagy valamelyik területi csoportjának vagy szakcsoportjának eredményes működéséhez;

– olyan személynek, aki rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek valóra váltásához;

– neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

Az emléktárgy korlátozott számban történő odaítélése az Elnökség hatáskörébe tartozik, az Elnökség e döntéséről a következő Küldöttközgyűlést tájékoztatni kell. Az odaítélt Eötvös Plakettet lehetőleg a Küldöttközgyűlés keretében kell átadni.

**1.1.4.** A Küldöttközgyűlés korábbi határozata értelmében a Társulat kimagasló tudományos kutatási eredmények, vagy ilyenek sikeres alkalmazásai elismeréseként az alábbi díjakat (Asz. 6. § d) pontja) adományozhatja.

– *Bozóky László-díjat* annak, aki a sugárfizika és a környezettudomány területén ért el kimagasló eredményt;

– *Bródy Imre-díjat* annak, aki a fizika alkalmazásának területén ért el kimagasló eredményt;

– *Budó Ágoston-díjat* annak, aki az optika, molekulafizika vagy a kísérleti fizika területén ért el kimagasló eredményt;

– *Detre László-díjat* annak, aki a csillagászat, vagy a bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén ért el kimagasló eredményt;

– *Gombás Pál-díjat* annak, aki az alkalmazott kvantumelmélet kutatása területén ért el kimagasló eredményt;

– *Gyulai Zoltán-díjat* annak, aki a szilárdtestfizika területén ért el kimagasló kutatási eredményt;

– *Jánossy Lajos-díjat* annak, aki az elméleti és kísérleti kutatások területén ért el kimagasló eredményt;

– *Novobátzky Károly-díjat* annak, aki az elméleti fizikai kutatások területén ért el kimagasló eredményt;

– *Schmid Rezső-díjat* annak, aki az anyag szerkezetének kutatása területén ért el kimagasló eredményt;

– *Selényi Pál-díjat* annak, aki a kísérleti kutatás területén ért el kimagasló eredményt;

– *Szalay Sándor-díjat* annak, aki az atom- vagy atommagfizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén ért el kimagasló eredményt;

– *Szigeti György-díjat* annak, aki a lumineszcencia- és félvezető-kutatások gyakorlati alkalmazásában ért el kimagasló eredményt.

A fenti díjakból évente összesen legfeljebb hat adományozható, odaítélésük a Társulat díjbizottságának (lásd: a jelen ügyrend 1.3. pont-

ja) javaslata alapján az Elnökség hatáskörébe tartozik. A díjakat a Küldöttközgyűlés keretében kell átadni.

A fent felsorolt díjakkal azonos eljárási rend alkalmazandó a Társulat Marx Györgyről elnevezendő *Felsőoktatási Díja* vonatkozásában.

**1.2.** A közoktatásban tevékenykedő fizikatanárok munkájának elismerését szolgáló *Mikola Sándor-díj* adományozható azoknak a fizikatanároknak, akik különösen a kísérletes fizikaoktatás, valamint a tehetséggondozás területén értek el kiemelkedő eredményeket. A díjból évente kettő adományozható, ezek közül egyet-egyet az Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport, illetve a Középiszkolai Oktatási Szakcsoport elnökségeinek javaslata alapján a Társulat Elnöksége ítél oda. A döntést előkészítő javaslatokat legkésőbb a minden év februárjában tartandó elnökségi ülés elé kell terjeszteni. A díjakat az illetékes szakcsoport soron következő tanári ankétján kell kiosztani.

**1.3.** A Társulat érmeinek és díjainak odaítélésére – a jelen ügyrend 1.2. pontjában megjelölt Mikola Sándor-díjak kivételével – az e célra létrehozott Díjbizottság tesz javaslatot. A díjakra történő jelölés lehetőségére vonatkozó felhívást minden évben a Fizikai Szemle februári számában, valamint a Fizinfo-n kell közzétenni. A Díjbizottság elnökét és tagjait a Társulat Elnöksége első ízben az előzetesen megválasztott új elnök hivatalba lépésének évében esedékes tisztújítást követően (először 2007 folyamán), ezt követően négyévente kéri fel, megbízatásuk négy éves időtartamra szól. A Díjbizottság személyi összetételéről a Társulat következő Küldöttközgyűlését tájékoztatni kell. Eljárási rendjét a Díjbizottság maga alakítja ki, üléseiről jegyzőkönyvet kell készíteni és azt az Elnökség felé kell továbbítani.

**1.4.** A Társulat központi rendezésű, országos fizikaversenyei díjainak odaítélése az adott verseny zsűriének feladatkörébe tartozik. A díjakat az adott versenyforduló zárása alkalmával kell átadni.

**1.5.** A Társulat szakcsoportjai, valamint területi csoportjai által létesített díjak odaítélése és átadása a díj alapításakor meghatározott szabályozás szerint kell, hogy történjen. Az adott díj szabályzatát a létesítő szakcsoport vagy területi csoport ülése fogadja el, hatályba lépéséhez a Társulat Elnökségének jóváhagyása szükséges.

**1.6.** A Társulat javaslattételi joga egyes Társulaton kívüli díjak esetében.

**1.6.1.** A Társulat javaslattételi joggal rendelkezik az Ericsson Magyarországi Kft. által a természettudományokat oktató általános és középiskolai tanárok munkájának elismerésére alapított Ericsson Díjak, valamint a Rácz Tanár Úr Életműdíj odaítélése vonatkozásában. A Társulat fizikatanárok díjazására vonatkozó javaslatát az e célból létrehozott, elnökből és hat további tagból álló bizottság készíti el. A bizottság elnökét a Társulat Elnöksége első ízben az előzetesen megválasztott új elnök hivatalba lépésének évében esedékes tisztújítást követően (először 2007 folyamán), ezt követően négyévente kéri fel, megbízatása – amely meg nem újítható – négy éves időtartamra szól. A bizottság elnökének személyére a Társulat elnöke, három-három tagjának személyére az Általános Iskolai, illetve Középiszkolai Oktatási Szakcsoport vezetősége tesz javaslatot. A bizottság tagjainak megbízatása ugyancsak négy évre szól, de a tagok felének személyét két évente cserélni kell. Ezt az előírást első ízben a 2007. évben kell alkalmazni. A bizottság elnöki tisztének betöltésére az egyetemeken folyó tanárképzésben részt vevő, az oktató tanárokat és tevékenységüket jól ismerő egyetemi oktatók, tagjaiként hosszabb oktatási tapasztalattal és elismert szakmai múlttal rendelkezző, a hazai fizikatanári közösséget jól ismerő fizikatanárok kéreandők fel.

**1.6.2.** A fenti díjakra történő előterjesztés elkészítése nyilvánosan meghirdetett javaslattételi felhívásra érkezett személyi javaslatok alapján történik. A javaslattételi felhívást a Fizikai Szemlelben, a Társulat honlapján valamint a Fizinfo-ban kell megjelentetni.

**1.7.** A társulati és egyéb díjak odaítélésére javaslatot tevő, valamint a díjakat odaítélő testületek tagjai társulati díjban nem részesülhetnek. Amennyiben ilyen személy társulati díjban való részesítésére érkezik javaslat, részvételét az adott évben az érintett testület munkájának egészében szüneteltetni kell, függetlenül attól, hogy a javasolt elismerést megkapja-e vagy sem.

## 2. A Társulat tagjai (Asz. 7. § – 10. §)

### 2.1. A társulati tagság és nyilvántartása.

2.1.1. A Társulathoz rendes tagként belépni szándékozó természetes személyek tagsága az Elnökség határozatával (Asz. 7. § (1) bek.) válik érvényessé, de a tagság kezdő időpontjaként a felvételi kérelem benyújtásának időpontja számít.

2.1.2. Jogi személyek pártoló tagsága a nyilvántartásba vételt megelőzően aláírt megállapodásban rögzített időponttal kezdődik.

2.1.3. A Társulat tagjairól a titkárság vezet folyamatosan karbantartott és a személyi adatok védelmével kapcsolatos mindenkor jogszabályi előírásoknak megfelelően kezelt tagnyilvántartást. A nyilvántartásban csak a felvételi kérelemhez tartozó adatlapon, önkéntes formában megadott személyi adatok tüntethetők fel. A tagnyilvántartás adatai kizárólag a Társulat működésével kapcsolatban használhatók fel, azok más szervezet részére át nem adhatók.

2.1.4. Az érvényes tagsággal rendelkező, valamint a tagdíjfizetéssel hátralékban lévő társulati tagok létszámáról a titkárság minden év áprilisában köteles az Elnökséget, továbbá tagjaik vonatkozásában az érintett szakcsoportok és területi csoportok vezetőit tájékoztatni. A tagdíj-hátralékkal rendelkező társulati tagokat hátralékos tagdíjuk rendezésére a Társulat titkársága közvetlenül hívja fel.

2.1.5. A társulati tagságnak az Asz. 10. § (3) bekezdésében foglaltak alapján való törlésének feltétele a hátralékos tagdíj befizetésének az erre irányuló felhívást követően egy évet meghaladó folytatólagos elmaradása.

2.1.6. Társulati tag kizárását az Asz. 10. § (4) bekezdésében foglaltak alapján bármely érvényes tagsággal rendelkező társulati tag, továbbá a Társulat bármely választott testülete kezdeményezheti. A kizárásra vonatkozó indítványban meg kell jelölni annak indokát, továbbá az indítványt alátámasztó bizonyítékokat. Az indítványt a Felügyelő Bizottság a beérkezéstől számított két hónapon belül véleményezni köteles. Az indítványt és a Felügyelő Bizottság véleményét javaslat formájában a Felügyelő Bizottság elnöke terjeszti a Társulat Elnökségének soron következő ülése elé.

### 2.2. Tagdíjak

2.2.1. A társulati tagdíj egy naptári évre érvényes és a tárgyév első negyedévében, év közben történt belépés esetén a belépést követő hónap folyamán egyenlítődni ki. Egy évnél rövidebb időszakra arányosan csökkentett tagdíj nem fizethető, de az év utolsó negyedévében történt belépés esetén a tagdíjfizetési kötelezettség az egyéni tagot csak a következő év kezdetétől terheli.

2.2.2. A Társulat egyéni tagjai által fizetendő tagdíjak összegét az Elnökség a tárgyév megelőző év decemberében, kivételesen a tárgyév januárjában tartott ülésén határozza meg. A megállapított tagdíjak összegét a Fizikai Szemle tárgyévi első számába helyezett betéttáblán kell nyilvánosságra hozni.

2.2.3. A Társulat pártoló tagjaként nyilvántartásba vett jogi személyek éves tagdíjának összegéről a nyilvántartásba vételt megelőző tárgyalás során kell megállapodni. A pártoló tagsághoz fűződő közhasznú kötelezettségvállalást írásos megállapodásban kell rögzíteni.

2.2.4. A társasági adó fizetésére kötelezett jogi személyek pártoló tagságával kapcsolatos előzetes tárgyalás során fel kell hívni a figyelmet a Társulat részére biztosított adományhoz, illetve a Társulat javára tett közhasznú kötelezettségvállaláshoz kapcsolódó adókedvezmény érvényesítésének lehetőségére. Az adomány fogalmát a társasági adóról és az osztalékadóról szóló 1996. évi LXXXI. törvény 4. § (1) bekezdése, a tartós adományozás fogalmát a közhasznú szervezetekről szóló 1997. évi CLVI. törvény 6. § (1) bek. d) pontja, továbbá a 26. § n) pontja határozza meg. A kedvezmény érvényesítésének további feltételeit az 1996. évi LXXXI. törvény 7. § (5)–(7) bekezdései rögzítik.

## 3. A Társulat szakcsoportjai (Asz. 11. §)

3.1. A Társulat keretében – az Asz. rendelkezéseivel és a Küldöttközgyűlés határozataival összhangban – jelenleg a következő szakcsoportok működnek:

- Anyagtudományi Szakcsoport;
- Atomfizikai és Kvantumelektronikai Szakcsoport;
- Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport;
- Csillagászati Szakcsoport;
- Diffrakciós fizikai Szakcsoport;
- Félvezető-fizikai Szakcsoport;
- Fizikatörténeti Szakcsoport;

- Középiskolai Oktatási Szakcsoport;
- Magfizikai Szakcsoport;
- Neutron és Szinkrotron Szakcsoport;
- Rézszeckszfizikai Szakcsoport;
- Szerves kondenzált anyagok fizikája Szakcsoport;
- Statisztikus fizikai Szakcsoport;
- Sugárvédelmi Szakcsoport;
- Termodinamikai Szakcsoport;
- Vákuumfizikai, -technológiai és alkalmazási Szakcsoport.

3.2. A Szakcsoport vezetősége (Asz. 11. § (3) bek.) létszámának meghatározása a Szakcsoport taggyűlésének hatáskörébe tartozik, azt a taggyűlés határozataként kell rögzíteni abban az esetben is, ha a Szakcsoport nem rendelkezik önálló Szervezeti és Működési Szabályzattal. A Szakcsoport taggyűlése választja meg a Szakcsoport küldöttein a Küldöttközgyűlésre. Küldöttnek a Szakcsoport vezetőségének tagjai is megválaszthatók, megbízatásuk négyévi időtartamra szól. A Szakcsoportnak jogában áll pótküldötteket is választani, akik a megválasztott küldött(ek) akadályoztatása esetén a taggyűlés által meghatározott sorrendben élhetnek a Szakcsoport részére biztosított képviseleti joggal.

3.3. A Szakcsoportok jogosultak szakterületüknek megfelelő, önálló rendezvények (előadói ülések, konferenciák stb.) szervezésére és lebonyolítására. Anyagi ráfordítást igénylő rendezvények, hazai és nemzetközi konferenciák szervezésében és lebonyolításában testületi anyagi felelősséget vállalni szándékozó Szakcsoportok kötelesek a Társulat titkárságának közreműködését igénybe venni. Ilyen esetben írásos feljegyzésben rögzített pénzügyi tervet, valamint lebonyolítási tervet kell készíteni, amelyekben meg kell fogalmazni, illetve meg kell jelölni – a Szakcsoport és a Társulat titkársága közötti feladatmegosztást, – a kapcsolattartásra és intézkedésre jogosult felelős személyek nevét, – a rendezvényvel kapcsolatos teendők, köztük a pénzügyi feladatok lebonyolításának részletes módját és ütemezését.

Az egyes rendezvényekhez kapcsolódó pénzügyi feladatokat a Társulat könyvvezetésében elkülönített költséghelyként kell nyilvántartani és kezelni. Az adott költséghelyen a rendezvény pénzügyi zárását követően mutatkozó esetleges maradvány későbbi felhasználását illetően a rendező szakcsoport elsőbbséget élvez.

3.4. A szakcsoport vezetősége a szakcsoport éves tevékenységéről összefoglaló beszámolót készíteni és azt a tárgyévet követő év január hó 31. napjáig a Társulat titkárságára eljuttatni köteles.

## 4. A Társulat területi csoportjai (Asz. 12. §)

4.1. A Társulat területi csoportjai munkájukat (Asz. 12. § (2) bek.) éves munkaterv alapján végzik, amelyet a csoport vezető tisztségviselői a tárgyév január hó 31. napjáig kötelesek elkészíteni és a Társulat titkárságára eljuttatni. A munkatervhez csatolni kell az abban szereplő feladatok megvalósításához szükséges, becsült ráfordításokat és azok forrásait tartalmazó költségvetést.

4.2. A Társulat területi szervezetei éves munkájukról beszámolót készíteni, és azt a tárgyévet követő év január hó 31. napjáig a Társulat titkárságára a 4.1. pontban foglalt munkatervvel egyidejűleg eljuttatni kötelesek. A beszámoló a csoport megvalósított tevékenységét bemutató általános részből, valamint a titkárság által rendelkezésre bocsátott úrlap felhasználásával készített gazdálkodási részből áll.

4.3. A pályázók önálló jogi személyiségét feltételezve, illetve megkívánó pályázat benyújtását a területi csoportok a Társulat titkárságának útján kezdeményezhetik. Ilyen esetben a pályázat előkészítése az előterjesztő területi csoport feladata, de azt a Társulat nevében a titkárság juttatja el a pályázatot kiíró intézményhez, illetve szervezethez. A szakszerű adminisztratív közreműködésért, valamint a pályázati úton elnyert pénzügyi kezeléséért a Társulat központi szerveit 2% kezelési költség illeti meg, ennek érvényesítésétől a főtitkár egyedi mérlegelés alapján eltekinthet.

4.4. A területi csoportok gazdálkodásának sajátos kérdései.

4.4.1. A Társulat területi szerveinek gazdálkodásának alapját a Társulat központi költségvetésének terhére biztosított pénzeszközök képezik. Ennek tárgyévi összegét a Társulat Elnöksége évente határozza meg, figyelembe véve a csoport előző évről szóló beszámolójában, valamint a tárgyévre vonatkozó munkatervben és az ehhez kapcsolódó költségvetésben foglaltakat.

4.4.2. A területi csoportok kiegészítő forrásként helyi szervezetektől származó, természetben vagy pénzben nyújtott, adott célra irányuló támogatást igénybe vehetnek, ezekről és felhasználásukról azonban évi beszámolójukban, teljes körben beszámolni kötelesek.

4.4.3. A területi csoport pénzeszközeinek kezelését erre felhatalmazott szervezet (általában az MTESZ helyi szervezete) végzi. A területi csoport nevére szóló, külön bankszámla csak különösen indokolt esetben, a Társulat főtitkárának engedélyével nyitható abban az esetben, ha a területi csoport évi pénzforgalma az 1 Mft összeghatárt meghaladja. Magánszemély részére nyitott bankszámlán a területi csoport pénzeszközei még átmenetileg sem helyezhetők el. Erre irányuló kérés esetén a területi csoport pénzeszközei a Társulat központi bankszámláján, elkülönített költséghelyen is kezelhetők.

4.4.4. A területi csoport pénzeszközeinek felhasználásával kapcsolatos intézkedések megtételére – a tárgyévi költségvetésben foglaltak keretei között – a csoport elnöke és titkára együttesen jogosultak. Az intézkedésre jogosult személyekről megválasztásukat követően a pénzeszközre feljogosított szervezetet tájékoztatni kell.

## 5. A Küldöttközgyűlés (Asz. 13. §)

### 5.1. A Küldöttközgyűlés előkészítése.

5.1.1. A Küldöttközgyűlés előkészítése során az Asz. 13. §-ában foglaltak szerint, a (2)–(6) bekezdésekben megadott határidők figyelembevételével kell eljárni.

5.1.2. A Küldöttközgyűlés napirendjére vonatkozó javaslatot a Társulat Elnöksége készíti elő. A napirendi javaslatot, valamint a határozatképtelenség esetére vonatkozó eljárást is rögzítő meghívót a jelen ügyrend 5.2.1. pontjában meghatározott küldötteknek postai úton kell elküldeni, azt egyidejűleg a Fizikai Szemlében, valamint a Fizinformatikus nyilvánosságra kell hozni.

### 5.2. A küldöttek

5.2.1. A szakcsoportok és területi csoportok által előzetesen megválasztott és az aktuális Küldöttközgyűlésen való képviselői jogokban a delegáló csoportok által aktuális (tagdíjhátralék-mentes) taglétszámuknak megfelelő létszámban a Küldöttközgyűlés tervezett időpontját 45 nappal megelőző határidővel megerősített küldötteket – a delegáló csoport által közölt lista szerint – névre szóló küldöttigazolvánnyal kell ellátni.

5.2.2. A Küldöttközgyűlés határozatképességét első ízben az ülés megkezdését megelőzően bemutatott és nyilvántartásba vett küldöttigazolványok alapján, hivatalból kell megállapítani. A határozatképességet az esetleg eltávozó küldöttek, illetve a később bemutatott és nyilvántartásba vett küldöttigazolványok száma alapján folyamatosan figyelemmel kell kísérni. A változásokról a Küldöttközgyűlés vezető elnökét és a szavazatszámoló bizottság (lásd: a jelen ügyrend 5.3.2. pontja) elnökét tájékoztatni kell.

### 5.3. A szavazások módja.

5.3.1. A Küldöttközgyűlésen szavazni csak a küldöttigazolvánnyal rendelkező küldöttek jogosultak (Asz. 13. § (7) bek.), ez a jog más személyre át nem ruházható. Nyílt szavazás esetén a szavazás a küldöttigazolvány felmutatásával, titkos szavazás esetén a küldöttigazolvány bemutatása ellenében átvett szavazólap felhasználásával történik.

5.3.2. Személyi kérdésekben való döntés csak titkos szavazás útján történhet. Ez alól kivételt képez a Küldöttközgyűlés megnyitását követően megválasztandó, három főből álló szavazatszámoló bizottság elnökének és két tagjának személye, akiket a Küldöttközgyűlés elnökének javaslata alapján, nyílt szavazással lehet megválasztani. A szavazatszámoló bizottság megbízása az aktuális Küldöttközgyűlés ülésének teljes időtartamára szól.

5.3.3. A titkos szavazás(ok) szavazólapját a titkos szavazást igénylő kérdések vitájának lezárását követően, a Küldöttközgyűlés által nyílt szavazással jóváhagyott tartalommal kell a jelenlévő küldöttek számára megfelelő példányban elkészíteni.

5.3.4. A nyílt és titkos szavazások eredményét – azok értékelését közvetlenül követően – a szavazatszámoló bizottság elnöke hirdeti ki.

### 5.4. A Küldöttközgyűlés érdemi munkája.

5.4.1. A Küldöttközgyűlés javasolt napirendjét a kiadott meghívóban fel kell tüntetni. A napirend elfogadásáról a Küldöttközgyűlés megnyitását és a határozatképességről való tájékoztatást közvetlenül követően – határozatképesség esetén a szükség szerint lefolytatott vita után – nyílt szavazással kell dönteni. Az esetleges határozatképtelenség miatt

ismételten megnyitott Küldöttközgyűlés munkáját csak a meghívóban feltüntetett napirend szerint végezheti, így arról ebben az esetben szavazni nem szükséges.

5.4.2. A napirend elfogadását követően kell megválasztani a szavazatszámoló bizottság elnökét és két tagját (lásd: a jelen ügyrend 5.3.2. pontja).

5.4.3. A Küldöttközgyűlés vezető elnöke köteles az ülést az elfogadott napirendnek megfelelően vezetni. Az egyes napirendi pontok vitája akkor és csak akkor zárható le, ha nincs további hozzászólásra jelentkező. A hozzászólási jog senkitől sem tagadható meg, amennyiben a hozzászólás az adott napirendi ponttal kapcsolatos. Napirenden nem szereplő kérdésekkel kapcsolatos felvetésekre csak az elfogadott napirend tárgyalásának lezárását követően kerülhet sor, ezek engedélyezésére a vezető elnök hatáskörébe tartozik.

5.4.4. Az adott napirendi pontok jellegétől függően több napirendi pont vitája, azok egymást követő előterjesztése után, összevontan is lebonyolítható, az előterjesztések elfogadásáról azonban ebben az esetben is külön-külön kell dönteni.

5.4.5. Tisztújítás esetén a személyi javaslatokat a jelölőbizottság elnöke terjeszti elő, aki a jelölés ismertetésének, a jelöléssel kapcsolatos vita lefolytatásának, valamint a szavazás lebonyolításának időtartamára átveszi a vezető elnöki tisztelet a Küldöttközgyűlés elnökétől.

5.5. A Küldöttközgyűlés határozatait a szerkesztett és hitelesített jegyzőkönyvben szereplő szöveggel kell a Határozatok Tárában elhelyezni.

## 6. Konzultációs fórumok (Asz. 15. §)

6.1. A Társulat – konzultációs jelleggel – adott kérdés megvitatására, az Asz. 15. §-ában felsoroltakon kívüli személyek meghívásával kibővített, egyúttal tematikus jellegű elnökségi üléseket is rendezhet.

## 7. A Társulat tisztségviselői (Asz. 17. §)

### 7.1. A vezető tisztségviselők megválasztása.

7.1.1. A Társulat vezető tisztségviselőinek megválasztására irányuló javaslatot a Küldöttközgyűlés által megválasztott jelölőbizottság (a továbbiakban: JB) készíti elő. A JB-ben viselt folyamatos tagság időtartama a négy évet nem haladhatja meg, ugyanakkor kívánatos, hogy a JB négy éven keresztül töltsön be feladatát. A jelölés előkészítése során a JB elnöke köteles felhívni a szakcsoportok és területi csoportok figyelmét a jelölés lehetőségére, a Küldöttközgyűlés elé terjesztendő javaslat kidolgozásánál e vélemények figyelembe vételével kapcsolatban a JB mérlegelési jogkörrel rendelkezik.

7.1.2. Az elnök kivételével (akinek a személyével kapcsolatban az Asz. ettől eltérően rendelkezik) a Társulat vezető tisztségviselői kétéves megbízatásának az Asz. 17. § (1) bek. első mondatában foglaltak szerinti meghosszabbítását a JB kezdeményezheti. A meghosszabbítást kimondó újraválasztás eljárási rendje azonos az első alkalommal történő megválasztás alkalmával követett eljárási renddel, azaz az eltéréssel, hogy a JB a 7.1.1. pontban foglalt véleménykérést, továbbá a közgyűlési előterjesztésben a személyre vonatkozó részletes indokolást mellőzheti.

## 8. A Társulat Elnöksége működésének egyes kérdései (Asz. 14. §)

### 8.1. Az Elnökség ülései és határozatai.

8.1.1. Az Elnökség üléseit elektronikus posta útján továbbított, az ülés javasolt napirendjét tartalmazó meghívóval kell összehívni. A meghívóhoz csatolni kell az ülés napirendjén szereplő kérdések előkészített, írásos anyagát.

8.1.2. Az ülések napirendjének kötelező pontjaként felveendő „Egyebek” pont keretében tárgyalandók meg az ülés résztvevői által írásban felvetett kérdések. Az „Egyebek” pont keretében kaphat helyet a korábban tárgyalt kérdésekhez kapcsolódó fejlemények rövid ismertetése.

8.1.3. Az Elnökség üléseit a Társulat elnöke, akadályoztatása esetén a Társulat főtitkára vezeti.

8.1.4. Az elnökségi ülések határozatait szó szerint jóváhagyott szöveggel kell meghozni.

8.1.5. Az ülésekről készített jegyzőkönyvet, illetve az azt helyettesítő, a vezető elnök által készített vagy jóváhagyott emlékeztető feljegyzést az ülést követő 10 napon belül az Elnökség valamennyi tagjának, valamint az ülésen részt vett meghívottaknak elektronikus posta útján el kell juttatni. A jegyzőkönyv vagy emlékeztető feljegyzés végleges szövegét az Elnökség következő ülése fogadja el.

8.1.6. Az elnökségi ülések rendjéért, az Alapszabályban és a jelen ügyrendben foglalt és az ülések rendjét érintő előírások betartásáért és betartatásáért az ülés levezető elnöke felel, aki szükség esetén jogosult a felszólalások időbeli korlátozására is.

**8.2.** Minden olyan szakmai tevékenységet folytató szervezet vezető testületében (kuratóriumában), amelyben a Társulat alapítói/tulajdonosi jogon, vagy felkérés alapján képviselőre jogosult, a Társulatot képviselő személy(ek)e)t e feladat ellátására az Elnökség kéri fel. A felkérés csak határozott időre szólhat, az érintett szervezetek, valamint a Társulat képviselőinek tevékenységét az Elnökségnek legalább két évente értékelnie kell.

## 9. A Társulat titkársága és működése (Asz. 21. §)

**9.1.** A munkáltatói jogok gyakorlása.

9.1.1. A Társulat ügyvezető titkárának személyéhez kapcsolódó munkáltatói jogokat a Társulat főtitkára gyakorolja azzal a megkötéssel, hogy az ügyvezető titkár munkaviszonyának létrehozásával és megszüntetésével kapcsolatban a Társulat Elnökségének előzetes állásfoglalását kell kérnie.

9.1.2. A Titkárság beosztott dolgozóinak személyéhez kapcsolódó munkáltatói jogokat az ügyvezető titkár gyakorolja, kivéve a munkaviszony létesítését és megszüntetését, ami a Társulat főtitkárának jogkörébe tartozik.

**9.2.** A titkárságnak az Alapszabályban, valamint a jelen ügyrendben foglaltaknak megfelelő működéséért, az ügyintézésben érvényesítendő határidők betartásáért az ügyvezető titkár a felelős. A titkárság működésének felügyeletét a Társulat főtitkára látja el.

## 10. A Társulat kiadványai (Asz. 23. §)

**10.1.** A Fizikai Szemle

10.1.1. A Fizikai Szemle szerkesztőbizottságának munkáját a Küldöttközgyűlés által megválasztott főszerkesztő teljes önállósággal és ennek megfelelő felelősséggel irányítja. Kizárólagos a felelőssége a lap színvonalának megtartásáért, a megjelenés folyamatosságáért, a szakmai és technikai szerkesztők közötti kapcsolatrendszer folyamatos működtetéséért.

10.1.2. A Fizikai Szemle főszerkesztője a Társulat Elnöksége ülésein állandó meghívott résztvevője.

10.1.3. A Fizikai Szemle impresszumában a kiadásért felelős személyként a lap főszerkesztőjét kell megnevezni.

**10.2.** A Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok (a továbbiakban: KÖMAL)

10.2.1. A KÖMAL kiadásával kapcsolatos kérdéseket a Társulat, a MATFUND Alapítvány és a Bolyai János Matematikai Társulat által határozatlan időre megkötött háromoldalú megállapodás szabályozza. A megállapodásban foglaltak érvényre juttatása során a Társulat gazdálkodásával kapcsolatos ügyrendi szabályozás (lásd: a jelen ügyrend 11. fejezete) szerint kell eljárni.

10.2.2. A KÖMAL-t a Társulat könyvvezetésében elkülönített költségként kell szerepeltetni.

10.2.3. A KÖMAL Kuratóriumában a Társulatot az Elnökség által meghatározott időre felkért két tag, valamint a Társulat főtitkára képviseli.

10.2.4. A KÖMAL impresszumában a kiadásért felelős személyként a Társulat főtitkárát kell megnevezni.

## 11. A Társulat gazdálkodása (Asz. 21. §)

**11.1.** A Társulat gazdálkodására a számvitelre, az egyéb gazdálkodó szervezetekre, valamint a közhasznú szervezetekre vonatkozó mindenkor hatályos jogszabályi előírások irányadók. A jelenleg érvényesítendő, általános előírásokat tartalmazó főbb jogszabályok:

- a 2000. évi C. törvény a számvitelről,
- a 114/1992 (VII.23) Kormányrendelet a társadalmi szervezetek gazdálkodó tevékenységéről,
- a 224/2000 (XII.19) Kormányrendelet a számviteli törvény szerinti egyéb szervezetek éves beszámoló készítésének és könyvvezetési kötelezettségeinek sajátosságairól,
- a közhasznú szervezetekről szóló 1997. évi CLVI. törvény vonatkozó rendelkezései.

**11.2.** A Társulat gazdálkodásáért, annak szabályszerűségéért közvetlenül az ügyvezető titkár, a felügyeleti jogkört tekintve a főtitkár a felelős.

**11.3.** A Társulat kettős könyvvezetésre kötelezett. Az ebből fakadó feladatokat megosztva látja el:

– A főkönyvi könyvelés feladatait évenkénti szerződéses megbízás alapján külső személy vagy szervezet látja el. E feladattal okleveles könyvvizsgálói, illetve mérlegképes könyvelői képesítéssel rendelkező személy, vagy olyan számviteli szolgáltatást nyújtó szervezet bízható meg, amelynek a feladatot elvégzésével megbízott tagja/alkalmazottja rendelkezik ilyen képesítéssel.

– A számlák szerinti könyvelés feladatait a Társulat állandó alkalmazásában álló könyvelő látja el, tevékenységét az ügyvezető titkár felügyeli.

**11.4.** A Társulat közhasznú szervezetként közhasznú egyszerűsített (gazdálkodási) beszámoló készítésére kötelezett, ennek megfelelően

– a beszámoló mérlegét a 224/2000 (XII.19) Kormányrendelet 4. sz. mellékletében foglaltak szerint,

– a beszámoló eredménykimutatását a 224/2000 (XII.19) Kormányrendelet 6. sz. mellékletében foglaltak szerinti tagolásban kell elkészíteni.

A beszámolót a főkönyvi könyvelés feladataival megbízott személy vagy szervezet készíti el, és a Társulat közhasznúsági jelentésének részeként a Társulat főtitkára terjeszti a Küldöttközgyűlés elé jóváhagyásra.

**11.5.** Anyagi kötelezettségvállalást tartalmazó szerződés, vagy ezt helyettesítő egyoldalú nyilatkozat aláírására

– egyetlen aláírást kívánó esetben a Társulat főtitkára, akadályoztatása esetén és előzetes egyeztetést követően a Társulat elnöke,

– cégszerű aláírást kívánó esetben első helyen a Társulat elnöke vagy főtitkára, második helyen az ügyvezető titkár jogosult. Egyéb esetekben a cégbíróági nyilvántartásban szereplő képviseleti aláírás-bejelentésben foglaltak az irányadók.

**11.6.** A Társulat éves, a tárgyévben tartott Küldöttközgyűlés által jóváhagyott költségvetés alapján működik. A költségvetés és a könyvviteli rendszer alapjául szolgáló éves számlarend január 15-i határidővel történő elkészítése – a számvitelről szóló 2000. évi C. törvény előírásainak betartásával – az ügyvezető titkár feladata.

A költségvetést az ügyvezető titkár készíti elő, és az előző év gazdálkodásáról szóló tájékoztatással együtt terjeszti előzetes megvitatásra a Társulat Elnöksége elé a tárgyév márciusában. A véglegesített beszámolót a tárgyévet követő év április hó 30. napjáig kell elkészíteni és az Elnökség soron következő ülése elé terjeszteni.

**11.7.** A Társulatnak címzett számlák érvényesítésére a számlában jelzett követelés alapjául szolgáló megrendelés, rendezvényhez kapcsolódó számla esetén a rendezvény pénzügyi tervében foglaltakkal történt egyeztetést követően az ügyvezető titkár jogosult.

**11.8.** A Társulat számlavezető bankjához címzett dokumentumok aláírása/érvényesítése kizárólag a számlavezető banknál történt aláírás-bejelentésben foglaltak szerint történhet. Az aláírások szabályszerűségéért az ügyvezető titkár a felelős.

**11.9.** A Társulat által alkalmazható adómentes kifizetések jogcímeit a személyi jövedelemadóról szóló 1995. évi CXVII. törvény 1. sz. mellékletének 3. pontja tartalmazza, a kifizetések korlátozásáról a fenti törvény 72/A. § (2) bekezdése rendelkezik.

**11.10.** A Társulatot közhasznú szervezetként megillető egyes mentességek feltételeit

– a vámmentesség vonatkozásában a vámjogról, a vámeljárásról valamint a vámigazgatásról szóló 1995. évi C. törvény, továbbá az ennek végrehajtásával kapcsolatban kiadott 45/1996 (III.25) Kormányrendelet,

– az egyes illetékfajták alól való mentesség vonatkozásában az illetékekről szóló 1990. évi XCIII. törvény rendelkezései rögzítik.

**11.11.** A Társulat szakcsoportjai önálló gazdálkodási tevékenységet nem folytatnak. A Társulat területi csoportjai gazdálkodásának sajátos kérdéseiről a jelen ügyrend 4.2.1.–4.2.4. pontjai rendelkeznek.

kossági sugárterhelés átfogó vizsgálatának, és jelentős szerepet kapott a berendezés az élelmiszerláncban keresztül történő  $^{137}\text{Cs}$  izotópkinetika ellenőrzésénél.

Pécsett, a Mecseki Ércbányászati Vállalat Egészségügyi Szolgálatánál 1966-ban üzembe helyeztek egy úgynevezett shadow-shield típusú ólomárnyékolással ellátott, nagy szcintillációs detektorral működő egészszteszámológót, mindenképp az uránbányában dolgozók radon leányelemektől eredő sugárterhelésének rendszeres ellenőrzésére. A mérőrendszer árnyékolását 1970-ben továbbfejlesztették, és a mérőelektronikát modernizálták. Az 1981-ig tartó üzemeltetés során mintegy 50 000 ellenőrző mérést végeztek, számos esetben igen nagy radon-expozíciót találtak. Az eredményeket szigorúan titkos adatként kellett kezelniük, így publikálásukra nem kerülhetett sor. Később, 1983-ban az anyagi támogatás megvonása miatt a berendezést lebontották.

Meg kell még említeni, hogy az elmúlt években a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen is létrehozta egy kisebb teljesítőképességű egészszteszámológós mérőrendszerrel, amelyet elsősorban oktatási célokra használnak.

Minőségbiztosítási programok keretében az országban rendszeresen üzemeltetett egészszteszámológós mérőhelyek, de mindenképp a KFKI AEKI és az OSSKI laboratóriumai gyakran részt vesznek hazai és nemzetközi szervezésű összehasonlító mérési akciókban, amelyek bizonyítják az alkalmazott módszerek és a mérési eredmények megbízhatóságát.

A 2. táblázatban összefoglaltuk a hazánkban létesített egészszteszámológós mérőrendszerek legfontosabb paramétereit: az üzembe helyezés évét, az árnyékolás, a detektor és a mérési geometria jellemzőit, valamint a jelentősebb alkalmazási területeket.

## SZÁZ ÉVE HALT MEG LUDWIG EDUARD BOLTZMANN, A STATISZTIKUS FIZIKA MEGALAPOZÓJA

Iglói Ferenc

MTA SZFKI, SZTE Elméleti Fizikai Tanszék

Száz éve, 1906. szeptember 5-én a Trieszt melletti Duinóban meghalt *Ludwig Boltzmann* osztrák fizikus, a 19. század elméleti fizikájának egyik legnagyobb alakja. Eredményei közül elsősorban a statisztikus mechanika megalapozását, a termodinamika második főtételének mikroszkopikus értelmezését, a nem-egyensúlyi és transzportfolyamatok leírását, valamint a feketetest-sugárzásra vonatkozó Stefan-féle  $T^4$ -es empirikus törvény mikroszkopikus levezetését szokás megemlíteni. Nevét a fizikában többek között a Boltzmann-állandó, a Maxwell-Boltzmann-eloszlás, a Boltzmann-tényező, a Boltzmann-féle transzportegyenlet és a Stefan-Boltzmann-törvény viseli. A 19. század egyik legnyitottabb, a konvenciókhoz nem ragaszkodó gondolkodója volt. Elméleti meggondolásait az anyag atomos, molekuláris felépítésének feltételezésére építette egy olyan időszakban, amikor az a tudományos közfelfogással szöges ellentétben állt. Elméletének jelentőségét saját korában nem ismerték fel, és eredményei tudományos viták keresztüztüében álltak. Ez is hozzájárult egyre inkább elhatalmasodó depressziójához, mely végül is öngyilkossághoz vezetett.

Ludwig Eduard Boltzmann 1844. február 20-án született Bécsben, a Landstrasse nevű kerület főutcájának

egyik házában. Apja császári adóhivatalnok, nagyapja pedig, aki Berlinből költözött Bécsbe, órásmester volt. Anyja *Katharina Pauernfeind*, akinek családja salzburgi illetőségű. A család nem sokkal Ludwig születése után Felső-Ausztriába költözött, előbb Welsbe, majd Linzbe. Itt járt Ludwig középiskolába is, ahol a tehetséges fiú osztályelső volt. 15 éves korában elvesztette apját, de anyja anyagi lehetőségeivel továbbra is biztosította, hogy csak a tanulmányaira kelljen koncentrálnia. 1863-ban a bécsi egyetemre iratkozott be fizikát tanulni, ma az egyetem fizikai intézete a Boltzmann-gassén található. Tanárai között volt a magyar származású *Petzval József*, a fotografiai lencsék tökéletesítője, *Andreas von Ettingshausen* és *Josef Stefan*. Stefan, akinek neve a feketetest-sugárzással kapcsolatban volt ismert, irányította a Boltzmann doktori értekezésével kapcsolatos vizsgálatokat is, melynek eredményeként 1866-ban a gázok kinetikus elmélete témakörben doktori címet nyert el.

1867-ben magántanári habilitáció után még két évig Stefan intézetében dolgozik, majd 25 évesen a grazi egyetem matematikai fizika professzorának nevezik ki. Közben több hónapig Heidelbergben (*Robert Bunsen* és *Leo Königsberger* mellett) és Berlinben (*Gustav Kirchhoff*



Ludwig Eduard Boltzmann (1844–1906)



Boltzmann (középen) és munkatársai Grazban 1887-ben. Az álló sorban balról az első Nernst, a harmadik Arrhenius.

és *Hermann von Helmholtz* mellett) dolgozik. Jellemző módon nem marad sokáig egy helyen. (Ő maga félig tréfásan ezt azzal magyarázta, hogy farsang utolsó éjszakája után, hamvazószerda hajnalán született.) Az 1873 és 1876 közötti időszakot követően, amikor Bécsben a matematika professzora, visszatér Grazba, ezúttal mint a kísérleti fizikai intézet vezetője. Itt egy viszonylag hosszabb, 14 éves boldog időszak következik. 1876-ban köt házasságot *Henriette von Aigentler*rel, három lányuk és két fiúk születik, és ekkor alakítja ki a természet statisztikus leírására vonatkozó elméletének alapjait is. A nyolcvanas években a nagy tudományos tekintélyt szerzett tudóst számos fiatal tehetség keresi fel, hogy tanuljon tőle, többek között *Svante Arrhenius* Svédországból, valamint *Walther Nernst* és *Wilhelm Ostwald* Németországból. A szakmai elismerést jelzi, hogy 1885-ben a Császári Tudományos Akadémia tagjának választja és a kormányzat is kitünteti, az egyetem rektora (1887) és udvari tanácsos (*wirkliche Hofrat*, 1889) lesz.

1890-ben Boltzmann a Münchener Egyetem elméleti fizika professzora lesz. Innen 1893-ban visszatér Bécsbe és egykori tanárának, Josef Stefannak lesz utódja az egyetem Elméleti Fizikai Intézetében. Bécsben azonban nem érzi jól magát, hiányzik a müncheni baráti társaság, és professzortársaival sem felhőtlen a viszonya. Különösen az 1895-ben a filozófia és tudománytörténet professzorának kinevezett *Ernst Mach*hal nem értik meg egymást: az atomok létevel kapcsolatosan vannak nagyon éles vitáik. Azért, hogy a Machhal való munkakapcsolatot elkerülje 1900-ban Wilhelm Ostwald hívására Lipcsébe megy. Ostwalddal ugyan tudományos vitáik vannak, de a személyes viszonyuk jó. Ennek ellenére Lipcsében kísérlet meg először öngyilkosságot.

1901-ben Machot egészségügyi problémái miatt nyugdíjazzák, ezért 1902-ben Boltzmann visszatér a bécsi intézet élére, még üresen álló korábbi pozíciójába. *Ferenc József* császár azzal a feltétellel nevezi ki újra professzornak, hogy Boltzmann becsületszavát adja, hogy a továbbiakban nem vállal állást a birodalmon kívül. Bécsi tanítványai közül megemlítjük *Paul Ehrenfest*, *Lise Meitner* és *Philipp Frank* nevét. Bécsben, fizika mellett, Mach óráit átvéve filozófiát is oktatott. Filozófia előadásai, különösen az első évben, nagyon népszerűek voltak, olyannyira, hogy annak megtartásához a legnagyobb előadóterem

is kicsinek bizonyult. Ennek hírére még *Ferenc József* császár is kihallgatáson fogadta a tudóst.

Élete utolsó éveiben komoly egészségi problémái voltak. Szeme úgy meggyengült, hogy sem írni, sem olvasni nem tudott, tudományos cikkeit feleségének diktálta. Emellett asztma és gyakran erős fejfájás kínozta, depressziójáról pedig már korábban szóltunk. Az 1906. szeptember 5-i halálát követően szeptember 8-án nagyszabású megemlékezést tartottak, melyen a korabeli tudományos élet vezető személyiségei is részt vettek. Bécs városa díszsírhelyet biztosított számára, és az 1933-ban a Zentralfriedhofban felállított sírkövön ott áll bevésvé az entrópia ( $S$ ) és a termodinamikai valószínűség ( $W$ ) közötti  $S = k_B \ln W$  egyenlet, ezzel Boltzmann legnagyobb tudományos felismerését örökítve meg.

Boltzmann élete során mintegy 140 tudományos közleményt jelentetett meg. Munkásságában alapvető szerepet játszik a kinetikus elmélet, amelynek első alkalmazásai között gázok molekuláinak sebességeloszlását határozza meg. Ebben a témakörben mintegy 16 közleménye jelent meg. A *Maxwell* által korábban talált és pontszerű, szabad részecskék leírására alkalmas összefüggést általánosítja külső erők esetére és többatomos molekulákra. Ennek során bevezeti a Boltzmann-tényezőt és felírja a Maxwell–Boltzmann-féle eloszlásfüggvényt. Számolásai során megalkotja a sokaság („Inbegriff”) fogalmát (olyan azonos rendszerek összessége, amelyek csak a kezdeti feltételek eltérő megadása miatt különböznek), és megfogalmazza az ergodikus hipotézist (amely az időre és sokaságra vett átlagolás ekvivalenciáját jelenti).

(A sokaság fogalmát Boltzmanntól függetlenül *Maxwell* és *J. Willard Gibbs* is bevezette. Míg Boltzmann-nál

Boltzmann sírja a bécsi Zentralfriedhofban.





az alapvető módszert a kinetikus és mechanikus megfontolások jelentik, Gibbs elméletében a különféle sokaságok játsszák a főszerepet (a boltzmanni sokaság fogalom Gibbsnél a „mikrokanonikus” típusnak felel meg). A Gibbs-féle formalizmus az egyensúlyi rendszerek esetén általában egyszerűbben használható, kvantumrendszerekre történő általánosítása is viszonylag könnyen kivitelezhető. A Boltzmann-féle megközelítést a modern fizikában elsősorban a nem-egyensúlyi, az egyensúlytól távoli rendszerek leírásánál tudjuk felhasználni.)

Másik fontos és Boltzmann egész életét végigkísérő probléma, amelyről 18 közleménye jelent meg, a termodinamika 2. főtételenek mikroszkopikus értelmezésére vonatkozik. Először 1872-ben, mechanikai alapon, a Boltzmann-féle transzportegyenlet és a H-tétel felhasználásával érvel. A H-tételt alkalmazó eljárás szépsége, hogy a 2. főtételeknek mind az egyensúlyi, mind a nem-egyensúlyi aspektusát magyarázni tudja. Az 1877-es tárgyalás már

tisztán statisztikus alapon áll, és nem tartalmaz semmilyen mechanikai megfontolást. Ebben a munkában jelenik meg először az entrópia és a termodinamikai valószínűség kapcsolata, amelyre Boltzmann sírkövével kapcsolatban már utaltunk.

Boltzmann tudományos elismerése már életében elkezdődött, a Royal Society tagjának választotta és az Oxfordi Egyetem díszdoktori címet adományozott neki. Ugyanakkor tudományos eredményeinek igazi fontosságát és értékét csak halála után ismerte fel a tudományos világ. Ebben nyilvánvalóan szerepet játszott az a tény is, hogy az anyag atomos szerkezetét, mely Boltzmann elméletének kiindulási pontja volt, csak halála után lehetett kísérletileg igazolni. Ma Boltzmann elsősorban a statisztikus fizika megalapozójaként tiszteljük.

A statisztikus fizikai kutatásokért háromévenként adományozott legnagyobb kitüntetés, a Boltzmann-medál, az ő nevét viseli.

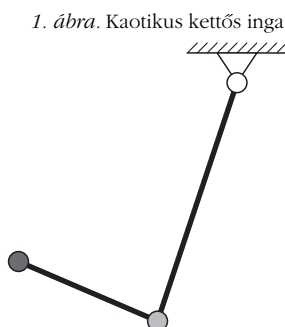
## A FIZIKA TANÍTÁSA

# IZGALMAS MÉRÉSEK A MÉRNÖK-FIZIKUS HALLGATÓI LABORATÓRIUMBAN

Vankó Péter  
BME, TTK, Kísérleti Fizika Tanszék

A kísérleti fizika laboratóriumi gyakorlatokon I–II. éves mérnök-fizikus hallgatók a fizika legkülönbözőbb területeiről összeválogatott mérési gyakorlatok keretében ismerkednek a fizikai mérések, a számítógépes adatgyűjtés és kiértékelés, valamint a hibaszámítás alapjaival. A legtöbb hallgató mindenféle mérési tapasztalat nélkül érkezik a középiskolából, de a háromórás mérések elvégzése, a táblázatokat, képleteket, számításokat és grafikonokat tartalmazó jegyzőkönyvek megírása a gyakorlattal rendelkezőknek sem könnyű feladat.

A mérési gyakorlat megszerzéséhez lényegében bármely mérés megfelelő lehet. A kísérletezésnek és a mérésnek azonban a rutin megszerzése mellett nagyon fontos szerepe van a fizikai szemlélet megalapozásában is. Ehhez alapvető fizikai jelenségekhez kapcsolódó, a hallgatókat motiváló, érdekes, izgalmas mérésekre van szükség.



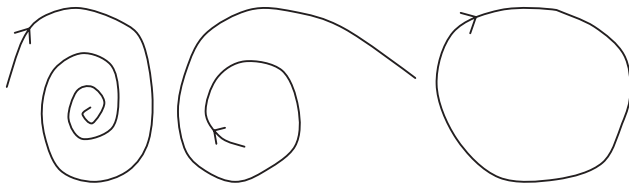
ség. A mérési feladatok korszerűsítésekor és új mérések tervezésekor ez a pedagógiai szempont az elsődleges.

A két alapozó félév gyakorlatai, a mérések leírásai megtalálhatóak az [1] internetcímen. Ebben az írásban két olyan mérést ismertetek, melyek a fizika izgalmas, modern területeit vizsgálják, ugyanakkor – a mérési feladat szintjén – a kezdő, még csak minimális elméleti ismeretekkel rendelkező hallgatóknak is érthetőek.

## Kaotikus kettős inga vizsgálata V-scope-pal

Kettős ingát úgy készíthetünk, hogy egy fizikai inga végéhez csuklóval egy másik fizikai ingát erősítünk (1. ábra). A kettős inga az egyik legegyszerűbb mechanikai rendszer, ami kaotikusan viselkedik. A kaotikus rendszer viselkedése hosszú távon megjósolhatatlan. Ennek oka a kezdőfeltételekre való rendkívüli érzékenység: ha a rendszert a legcsekélyebb mértékben különböző kezdeti feltételekkel hagyjuk magára, akkor véges időn belül teljesen eltérően fog viselkedni. Ugyanakkor *pontosan* ugyanazt a kezdőállapotot soha nem tudjuk megvalósítani.

Mikor lehet egy rendszer kaotikus? Ha a rendszernek legalább három szabad paramétere van, és a rendszert leíró egyenletek nemlineáris tagot is tartalmaznak [2]. A legalább három szabad paraméter azért szükséges, mert ekkor a fázistérben kialakulhat olyan trajektória, amely



2. ábra. Két dimenzióban nem alakulhat ki kaotikus trajektória

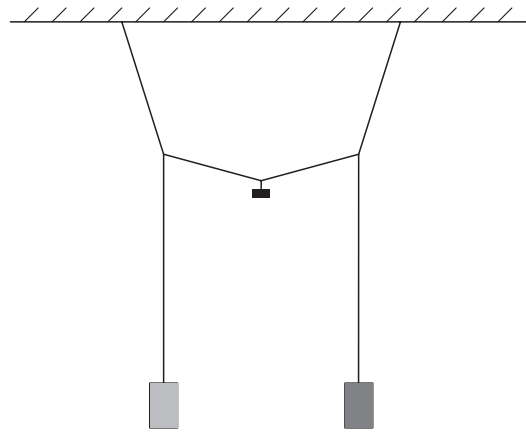
nem tart sem egy véges ponthoz, sem a végtelenbe, és ugyanakkor soha nem záródik. Két dimenzióban ez nem lehetséges (2. ábra).

A kaotikus kettős inga mozgása nagyon látványos, ezért gyakran bemutatják. Ha a rendszer kezdő energiája elég nagy, az alsó „kis kar” – teljesen váratlanul – többször is körbefordulhat. Mérés nélkül is jól látszik, hogy a megismételt, a lehető legpontosabban ugyanonnan elindított mozgások jelentősen különböznek.

A kettős inga kaotikus viselkedését számítógépen is lehet szimulálni. Az interneten rengeteg ilyen program található (és a hallgatók is nagyon szép programokat készítettek a laborhoz lazán kapcsolódó szorgalmi feladatként). Természetesen – szemben a valósággal – a számítógép tökéletesen meg tudja ismételni a korábbi futást. Itt a kezdőállapot kis különbségét (vagy a mozgást zavaró kis zajokat) és a sűrűlődségből, légellenállásból adódó csillapodást mesterségesen kell beépíteni a programba. A szimuláció érdekes és hasznos kiegészítése lehet a mérésnek, de valódi mérés nélkül akár szemléletromboló is lehet, hiszen a számítógépen bármit be lehet programozni, függetlenül a valóságtól. A kaotikus viselkedés vizsgálatához és megértéséhez fontos a kvantitatív mérés! Valódi mérésről – a szimulációkról szólókkal szemben – csak kevés cikk számol be. Az ingakarok szögelfordulását lehet mérni a csapágyakba beépített potenciométer segítségével [3], vagy a mozgás stroboszkopikus fényképezésével [4]. Iskolai vagy egyetemi tanterv szerint, rendszeresen végzett mérésről – az itt ismertettnél kívül – nincs tudomásom.

#### Ismerkedés a V-scope mérőrendszerrel

A BME mérnök-fizikus hallgatói laboratóriumában a kaotikus kettős inga mérése *V-scope* segítségével történik. A *V-scope* térben mozgó testek mozgását követi nyomon: a kísérletben részt vevő testek háromdimenziós koordinátáit méri és rögzíti az idő függvényében. A *V-scope* három „torony”-ből, a vizsgált testekre rögzített „gombocskák”-ból és egy mikroszámítógépből áll. Az infravörös jellel aktivált „gombocskák” ultrahangot bocsátanak ki. A „toronyok” mérik az ultrahangjel beérkezési idejét, a mikroszámítógép ebből a hang terjedési sebességének ismeretében határozza meg a „gombocskák” térbeli helyzetét. A mért adatok a rendszerhez tartozó szoftverrel megjeleníthetők, vagy további adatfeldolgozáshoz kimenthetők. (A *V-scope* működéséről [6] és felhasználásáról [6, 7] több írás is megjelent a *Fizikai Szemlében*.)



3. ábra. Csatolt ingák

A hallgatók a *V-scope*-pal már a kaotikus kettős inga vizsgálata előtt, egy másik mérésben megismerkednek. Ebben a Szegedi Tudományegyetem hallgatóinak méréséhez [7] hasonlóan csatolt ingák mozgását tanulmányozzák (3. ábra). Az általam összeállított mérés – a szegedi méréssel ellentétben – kihasználja, hogy a *V-scope* három dimenzióban képes a nyomkövetésre: így az ingák mozgását nemcsak a csatolással párhuzamos, hanem a csatolásra merőleges irányban is mérni lehet. A csatolatlan inga, a csatolatlan kúpinga mérése után a csatolással párhuzamosan és a csatolásra merőlegesen kiterített csatolt ingák mérése következik (csatolási állandó mérése a csatoló tömeg függvényében). Itt csak az utolsó, leglátványosabb mérés eredményét mutatom be: csatolt kúpingák mozgása.

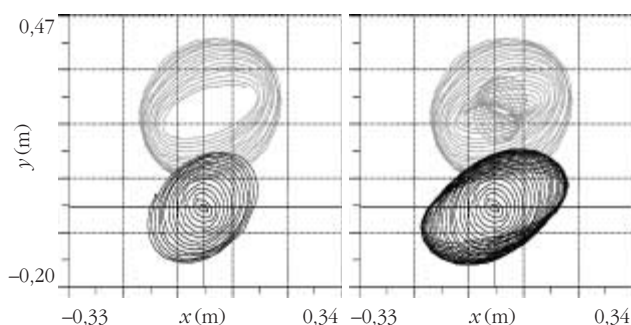
A hallgatók a *V-scope*-pal már a kaotikus kettős inga vizsgálata előtt, egy másik mérésben megismerkednek. Ebben a Szegedi Tudományegyetem hallgatóinak méréséhez [7] hasonlóan csatolt ingák mozgását tanulmányozzák (3. ábra). Az általam összeállított mérés – a szegedi méréssel ellentétben – kihasználja, hogy a *V-scope* három dimenzióban képes a nyomkövetésre: így az ingák mozgását nemcsak a csatolással párhuzamos, hanem a csatolásra merőleges irányban is mérni lehet. A csatolatlan inga, a csatolatlan kúpinga mérése után a csatolással párhuzamosan és a csatolásra merőlegesen kiterített csatolt ingák mérése következik (csatolási állandó mérése a csatoló tömeg függvényében). Itt csak az utolsó, leglátványosabb mérés eredményét mutatom be: csatolt kúpingák mozgása.

A 4. ábrán a két inga vízszintes pályája látható (alulnézetben: a „toronyok” az ingák alatt, a földön elhelyezve, felfelé „nézik” az ingák alá rögzített „gombocskákat”). Az ábra két része ugyanazt a mozgást ábrázolja két különböző időpontban megállítva. Kezdetben az ábrán felül látszó (halványabban ábrázolt) ingát kúpingaként indítottuk el, míg a másik inga állt. Az  $x$  és  $y$  irányú csatolási állandók különbözősége miatt a körpályák ellipsziszalakúvá válnak. Ráadásul a csatolási állandók különbözősége miatt az  $x$  és  $y$  irányú periódusidők is kismértékben különböznek, ezért az ellipszisek lassan el is fordulnak.

#### A kaotikus kettős inga mérése

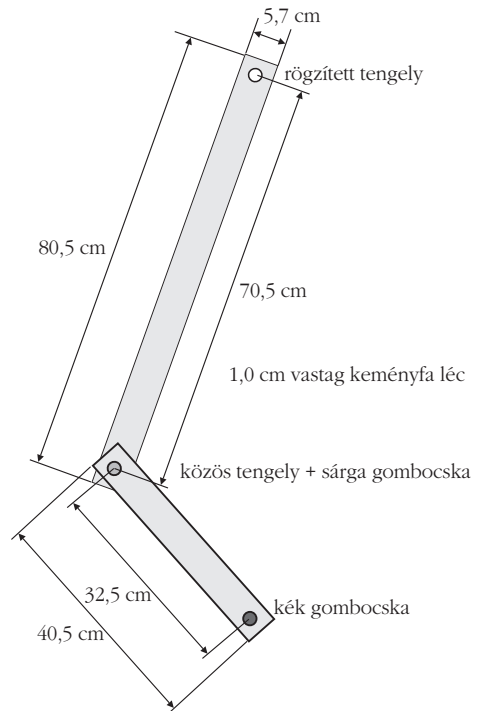
A méréshez használt kettős inga képe az 5. ábrán, méretei a 6. ábrán láthatóak. A keményfából készült kettős inga rögzített csapágya egy stabil öntöttvas állványra van felszerelve. A „gombocskák” a két ingakart összekapcsoló csapágnál (a nagy kar végén) és az alsó (kis kar) végpontjában vannak. Az origó a rögzített tengelyhez van

4. ábra. Csatolt kúpingák nyoma két különböző időpontban





5. ábra. A méréshez használt kettős inga



6. ábra. A méréshez használt kettős inga méretei

beállítva. A toronyok, a mikroszámítógép és a számítógép a kettős ingától körülbelül 3 méter távolságra, egy asztalon vannak felállítva (7. ábra). A mérési gyakorlat során 7 különböző (egyre nagyobb kezdeti energiájú) helyzetből kell elindítani a kettős ingát – minden helyzetből (amilyen pontosan csak lehet, ugyanonnan) egymás után négyszer.

A 8. ábrán az egyik indítási helyzet látható (a nagy kar vízszintes, a kis kar szabadon lóg). Az indítási helyzet beállítása is a V-scope segítségével történik: a 9. ábrán látható a számítógép képernyője az indítás pillanatában. A grafikon melletti „műszereken” a (nagy kar végére szerelt) „sárga gombocsk” koordinátái (és az idő) láthatóak – a kezdeti helyzetet ezek segítségével lehet beállítani. Mivel a V-scope az egész mozgást (a beállítást és a vizsgált kaotikus mozgást is) rögzíti, a mérés után a szabad mozgás előtti részt le kell vágni.

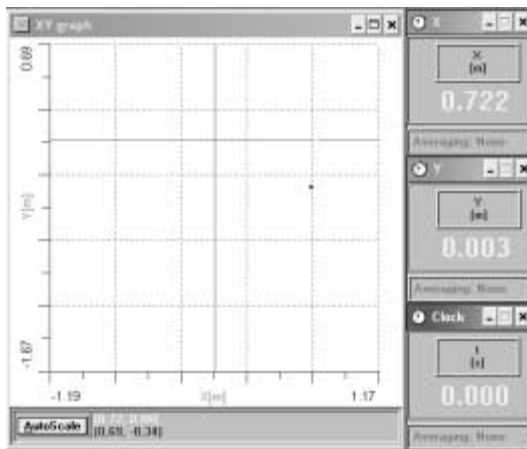
7. ábra. A V-scope „toronyok” és a számítógépek



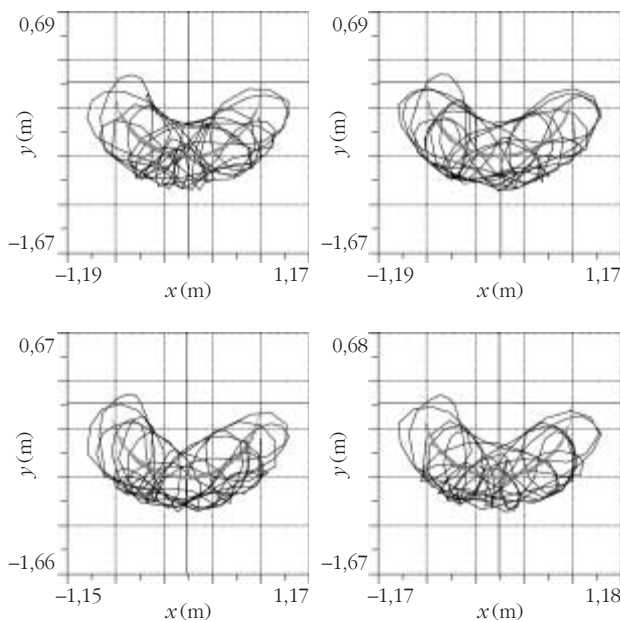
A 10. ábrán látható a négy „azonos” helyről (8. ábra) indított mozgás első 15–15 másodpercének grafikonja. A kicsit halványabb, félkör alakú vonal értelemszerűen a nagy kar végének („sárga gombocsk”), míg a sötétebb, szabálytalan vonal a többször körbeforduló kis kar végpontjának („kék gombocsk”) a nyoma.

8. ábra. A kettős inga indítása





9. ábra. Az inga kezdeti helyzetének beállítását a V-scope segíti



10. ábra. Négy ugyanonnan indított mérés első 15–15 másodperce

## A mérési adatok feldolgozása

A V-scope-hoz tartozó szoftverrel egyszerre csak egy mérés ábrázolható, elemezhető. A négy „azonos” helyről indított mozgás összehasonlításához az adatokat más programok által is használhatóvá kell tenni. Sajnos a szoftver által kínált adatexportálási lehetőség ilyen nagy adatállományok esetében nem működik (a program „lefagy”). Szerencsére a V-scope által tárolt .vsw és .ves kiterjesztésű fájlok elég könnyen megfejthető formátumban tárolják az adatokat, így azok egy egyszerű pascal programmal könnyen .txt formátumú fájlkká alakíthatóak, melyekben a két gomboska  $x$ ,  $y$  és  $z$  koordinátái, valamint az időadatok szerepelnek.

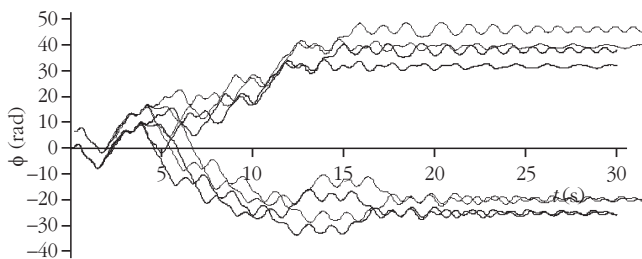
A hallgatóknak ezekből az adatokból kell mindkét karra szögelfordulás–idő grafikonokat készíteniük. A feladatot a kis kar esetében több körülmény is nehezíti. A kis kar két végpontjának koordinátáit a V-scope nem egyszerre, hanem felváltva méri – emiatt a lassabban mozgó vég koordinátáit a megfelelő időpillanatban interpolációval kell meghatározni. A kis kar többször is kör-

befordulhat a mozgás során – ezeket az átfordulásokat megfelelően kezelni kell. A hallgatók szabadon választhatják meg a számításokhoz az eszközöket: a feladatot pascal vagy C programmal és excel táblázatkezelővel is megoldható.

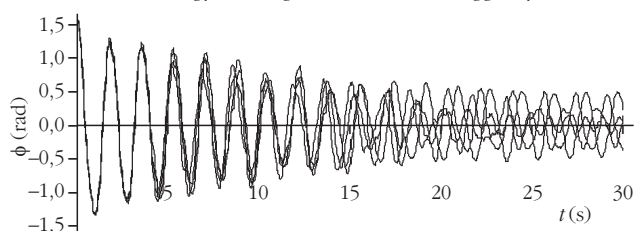
A 11. és 12. ábrán a kis kar és a nagy kar szögelfordulása látható az idő függvényében. Mindkét grafikonon látható, hogy a görbék vonalvastagságon belül ugyanúgy indulnak, de körülbelül 4 másodperc után szétválnak egymástól. A kis kar elfordulását ábrázoló grafikonon különösen feltűnő a különbség: az egyes mérések végállapotai között 60–65 rad (10 teljes körbefordulás!) különbség is lehet. A 13. és 14. ábrán a mozgás első 6 másodperce látható nagyítva: itt még jobban megfigyelhető a szétválás folyamata.

A mérési feladat 7 ilyen grafikonpár megrajzolása és a szétválás idejének meghatározása (különböző kezdőállapotból induló mozgások esetén). Kis kezdeti energiáknál, amikor a kis kar nem tud átfordulni, a kaotikus jelleg

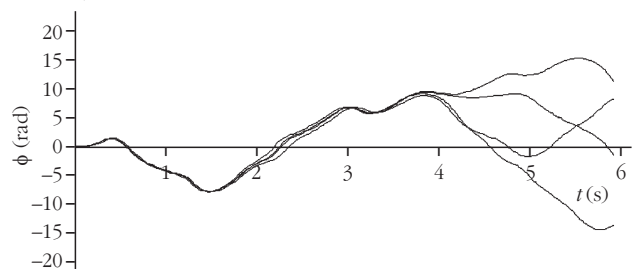
11. ábra. A kis kar szögelfordulása az idő függvényében



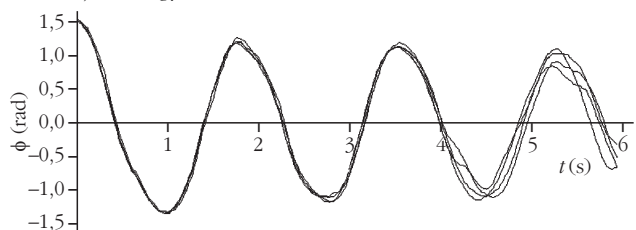
12. ábra. A nagy kar szögelfordulása az idő függvényében

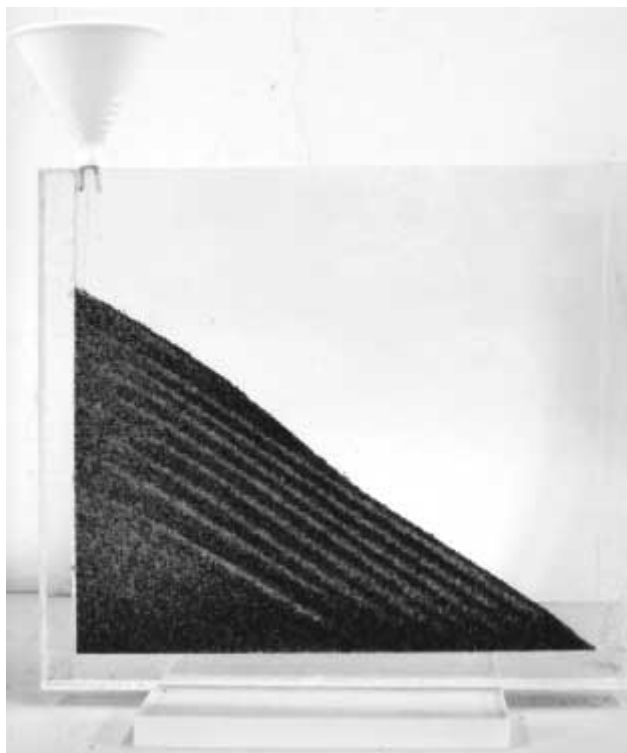


13. ábra. Az azonosan induló grafikonok szétválása (kis kar – a 11. ábra elejének nagyítása)



14. ábra. Az azonosan induló grafikonok szétválása (nagy kar – a 12. ábra elejének nagyítása)





15. ábra. Eszköz a rézsűszög méréséhez

nem, vagy csak kevésbé figyelhető meg. A kaotikus mozgás részletesebb vizsgálatához (például a Ljapunov-exponens meghatározásához) a másodéves hallgatók még nem rendelkeznek előismeretekkel, így az természetesen, nem is feladat.

## Granulált anyagok vizsgálata

A granulált (szemcsés, granuláris) anyagok nagyszámú, szilárd szemcséből állnak. A természetben és az ipari gyakorlatban nagyon sok egymástól különböző anyag tartozik ebbe a csoportba a néhány mikrométeres festékpороktól a kőomlások méteres nagyságú szikladarabjaiig, a szabályos kis golyóktól a teljesen szabálytalan, szögletes formákig. Meglepő, látványos viselkedésükre még csak részben sikerült elméleti magyarázatot találni [8, 9].

### Rézsűszög és szegregáció

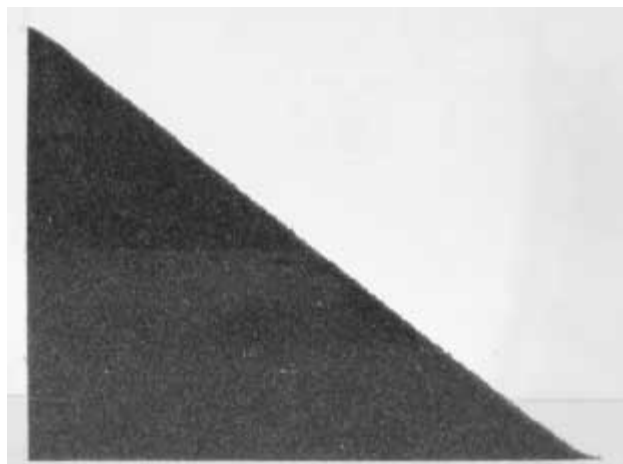
Ha a kohézió (száraz anyag esetében) elhanyagolható, akkor a granulált anyag egyensúlyát a gravitáción kívül kizárólag a szemcsék közti és a külső határoló felületek által kifejtett nyomó és súrlódási erők határozzák meg. A probléma ennek ellenére nagyon bonyolult: nemcsak a szemcsék nagy száma és általában szabálytalan alakja, hanem a tapadási súrlódási erők következtében létrejövő befürdések, beékelődések miatt is. A nyugalomban lévő granulált anyag termodinamikai szempontból tipikus nem-egyensúlyi rendszer. A lehetséges minimális értéknél jóval nagyobb potenciális energiájú elrendeződések is „befagyhatnak”, hiszen az atomi méreteknél jóval nagyobb szemcsék aktiválásához szobahőmérsékleten a termikus ger-

jesztés nagyon kevés, a külső mechanikai hatások megszűnése után a szemcsék rugalmatlan ütközései pedig hamar felemészítik a rendszer kinetikus energiáját.

A granulált anyagok sztatikájának legegyszerűbb kísérleti vizsgálata a *rézsűszög* mérése. A mérés első felében két párhuzamos plexilap közé tölcseren át különféle homogén és kevert granulált anyagokat öntenek a hallgatók (15. ábra). Bár a granulált anyagok a folyadékokhoz hasonlóan önthetőek, az edényben nem terülnek teljesen szét, hanem az anyag minőségétől (valamint a két lap távolságától, az öntés sebességétől) függő meredekségű lejtőt alkotnak. A lejtő – többé-kevésbé egyenes – vonalnak a vízszintessel bezárt szöge a rézsűszög. A 16. ábrán egy (pirosra festett) díszhomok aránylag meredek, a 17. ábrán apró, közel gömb alakú (világossárga) üvegyöngyök sokkal laposabb rézsűje látható. A rézsűszög könnyen mérhető.

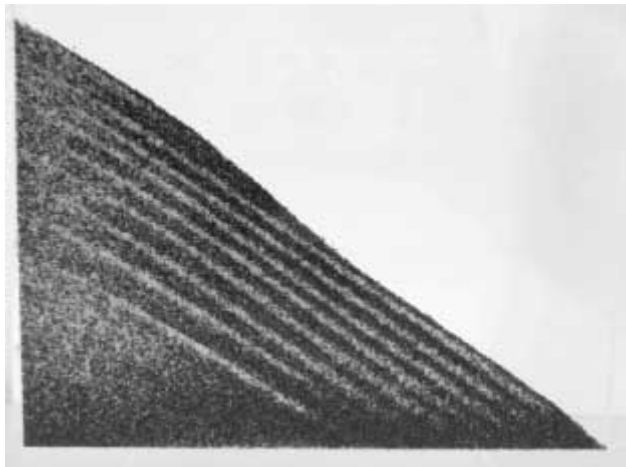
A mérés izgalmasabb és látványosabb része a keverékek viselkedése. Már az öntés előtt furcsa jelenséget lehet megfigyelni: rázás hatására a keverék két komponense általában nem összekeveredik, hanem szétválak. (Összekeverni – úgy-ahogy – legfeljebb egy kiskanállal lehet.) A különböző alakú, méretű, sűrűségű szemcsék spontán szétválása a szegregáció. A keverékek beöntésekor a különböző méretű és alakú (különböző rézsűszögű) szemcsék másképp gurulnak le a lejtőn, és emiatt – nem túl gyors beöntés esetén – többé-kevésbé szabályos rétegekbe rendeződnek. A 15. és 18. ábrán az előbb bemu-

16. ábra. Piros homok meredek rézsűje

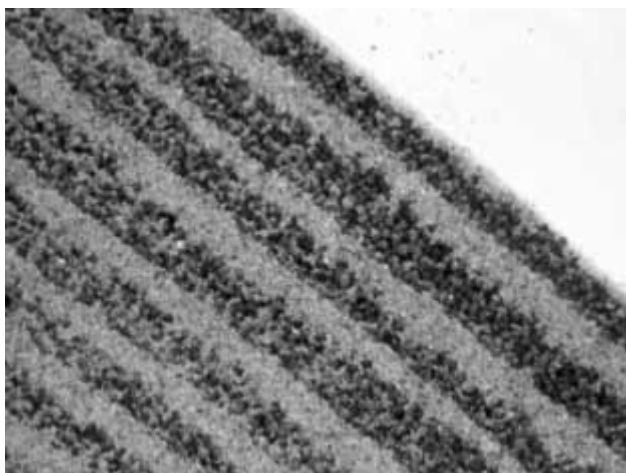


17. ábra. Sárga üvegyöngy lapos rézsűje





18. ábra. Piros homok és sárga gyöngy szegregációja



19. ábra. Homok és mák réteges szegregációja

tatott piros homok – sárga üvegyöngy keverék beöntésekor kialakuló mintázat látható. A rétegek úgy jönnek létre, hogy az egyik anyag lavinaszerűen legurul a másikon, majd alulról felépít egy réteget. A 18. ábrán felül jól látszik egy, a beöntés végén félbemaradt lavina. A 19. ábrán mák és játszótéri homok az előzőhöz hasonló szegregációja látható. A beöntési sebességtől is erősen függő rétegvastagság akár a helyszínen, akár a fényképeken egyszerűen mérhető.

### Mintázatképződés

A granulált anyag folyamatosan mozgásban tartható, ha a szemcsék rugalmatlan ütközése során elvesző (elsősorban hővé alakuló) energiát külső mechanikai gerjesztéssel (rázással, keveréssel, öntögetéssel stb.) folyamatosan pótoljuk. A mérés második részében granulált anyag rázásakor kialakuló mintázatok vizsgálata a feladat. A rázás hatására, ha a maximális gyorsulás nagyobb, mint a  $g$  nehézségi gyorsulás, a szemcsék egymáshoz képest is mozogni kezdenek, egymással és az edény falával ütköznek, az ütközések között pedig a gravitáció és a közegellenállás által meghatározott pályán repülnek.

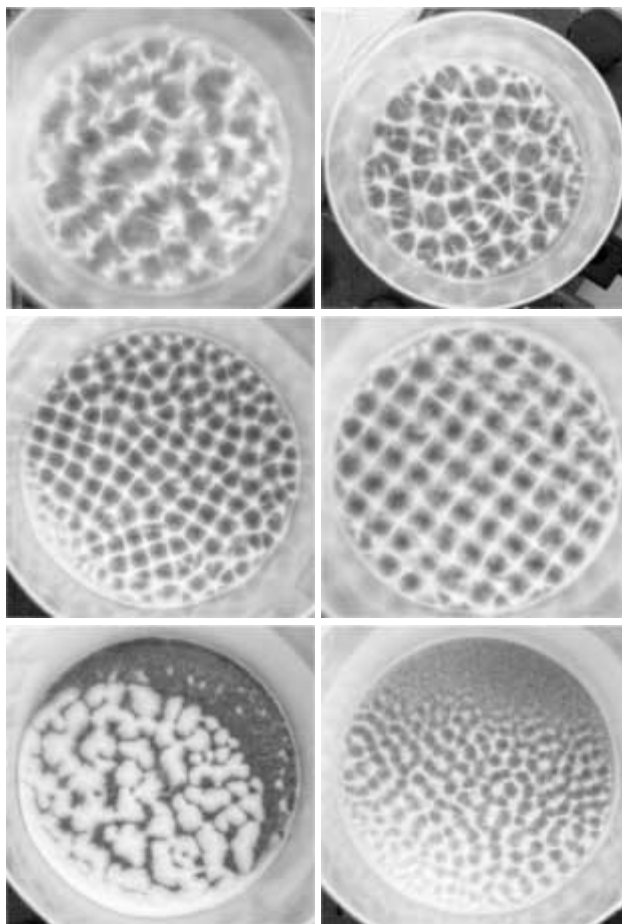
Egyetlen szabadeséssel függőlegesen mozgó és egy harmonikusan rezgő vízszintes lemezzel ütköző golyó

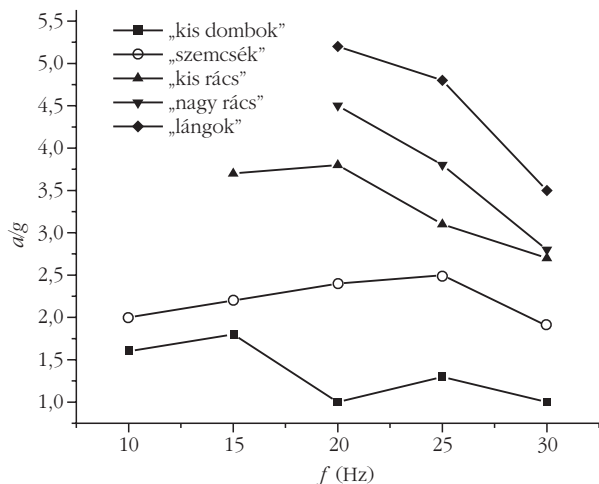


20. ábra. Mérési elrendezés a mintázatképződés vizsgálatához

mozgásának leírása se könnyű, hiszen a kialakuló mozgás nem periodikus. Nagyon nagy számú szemcse háromdimenziós mozgása (amit kis szemcseméret esetén a közegellenállás is jelentősen befolyásol) és (az általában szabálytalan alak miatt) bonyolult ütközései teljesen kiszámíthatatlan mozgást sejtetnek. Ezzel szemben a tapasztalat szerint a szemcsék rezgetésekor gyakran többkevesbé szabályos mintázatok keletkeznek. Miközben az egyes szemcsék mozgása hosszú távon valóban teljesen megjósolhatatlan, a sokaság kollektív mozgása mégis rendezettnak tűnik. A szemcsék tulajdonságainak, a rá-

21. ábra. Különböző jellegzetes mintázatok (0,15 mm-es üvegyöngy 1 mm vastag rétege)





22. ábra. Hallgatók által mért  $a-f$  fázisdiagram

zott granulált anyag mennyiségének, valamint a rázási frekvenciának és az amplitúdónak függvényében nagyon változatos formák jelenhetnek meg: állóhullámok, négyzöges és hatszöges mintázatok, örvénylés, „fortyogás”, dombképződés stb.

A mérési feladat a mintázatok megfigyelése és feltérképezése a maximális gyorsulás-frekvencia ( $a-f$ ) fázis térben. A mérési berendezés a 20. ábrán látható: a rázó-gép függőleges tengelyű hengeres műanyag edényét egy hangszórómembrán hozza függőleges irányú rezgőmozgásba. A rezgés frekvenciája és amplitúdója a hangszórómembránra kapcsolt szinuszos jel frekvenciájától és nagyságától függ. Az edény gyorsulását egy gyorsulásmé-

rő csip méri (a képen egyelőre csipessel rögzítve az edényhez). A mérési gyakorlat során 0,15 mm átmérőjű üvegyöngy 1 és 3 mm vastag réteget, valamint homokot rezgetnek a hallgatók. A mintázatképződés a 10–30 Hz frekvencia- és 1 g–5 g gyorsulástartományban figyelhető meg. A 21. ábra hat darab fényképén jellegzetes mintázatok láthatók, a 22. ábrán pedig egy, a hallgatók által kimért fázisdiagram.

Tapasztalataink szerint a hallgatók szeretik ezeket a méréseket. Sokan szívesen fordítanak a kötelezőnél több időt és energiát a mérés elvégzésére és a jegyzőkönyv elkészítésére is. A szokatlan és izgalmas feladatok gyakran a kevésbé érdeklődő hallgatókat is fellelkesítik, és elkezdnek „játszani”.

#### Irodalom

1. Kísérleti fizika labor I-II. <http://goliat.eik.bme.hu/~vanko/labor/labor.htm>
2. TÉL T., GRUIZ M.: *Kaotikus dinamika* – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002.
3. BÉKÉSSY L.I., BUSTYA Á.: *Fizikai kettősinga vizsgálata* – Fizikai Szemle 55 (2005) 185
4. T. SHINBROT, C. GREBONI, J. WISDOM, J.A. YORKE: *Chaos in a double pendulum* – Am. J. Phys. 60 (1992) 491
5. M. RONEN, A. LIPMAN: *A vektorszóóp – báromdimenziós mozgások nyomkövetése és elemzése* – Fizikai Szemle 45 (1995) 395
6. ERLICHNÉ BOGDÁN K., DEDE M., DARAI J., DEMÉNY A.: *Hely- és időmérés, adatfeldolgozás V-scope és számítógép alkalmazásával* – Fizikai Szemle 55 (2005) 213
7. FARKAS Zs.: *A vektorszóóprendszer alkalmazása a kinematikában* – Fizikai Szemle 54 (2004) 345
8. JÁNOSI I.: *A homok titkai* – Természet Világa 129 (1998) 19
9. JÁNOSI I.: *Zajongó homokdombok és egyéb furcsaságok: új fejlemények a granuláris anyagok fizikájában* – Fizikai Szemle 45 (1995) 78

## FIZIKATANÁRNAK LENNI JÓ

– beszámoló a magyar fizikatanárok 2006. évi továbbképzéséről a CERN-ben

Sebestyén Klára, PTE Deák Ferenc Gyakorló Gimnázium, Pécs

Simon Péter, Leőwey Klára Gimnázium, Pécs

Vihartné Balogh Éva, Bánki Donát Ipari Szakközépiskola, Tatabánya

Egészen a 19. század végéig az iskolai fizika tantervekben megjelent a fizika tudomány által elért eredmények legjava. A fizika mint tudomány igen közel volt a fizikához mint tantárgyhoz. Közismert például, hogy *Balmer* (svájci) középiskolai tanárként adott formulát a hidrogén látható spektrumvonalaira. Alig több, mint 100 esztendeje a helyzet megváltozott, a mai tudomány mérföldekkel az oktatás előtt jár, s az idő múlásával ez a távolság csak növekszik. A tanároknak szükségük van a tudósok szakmai támogatására! Talán ezt ismerte fel *Eötvös Loránd*, amikor 1895 nyarán 32 résztvevővel több, mint kéthetes továbbképzést vezetett fizikatanárok számára Budapesten. Ez volt az első ilyen jellegű tanfolyam. (Eötvösnek természetesen még számos tevékenysége támogatta a középiskolai fizikatanárokat.) A 20. században folytatódott az „eötvösi hagyomány”. Számptalan tudós, egyetemi

oktató szerepelt tanári ankétokon előadóként. Tanfolyamokat, tanulmányutakat, oktatási kísérletet, oktatási konferenciákat szerveztek fizikatanárok számára. A 21. századra sem maradtunk egyedül. Erre szép példa a 2006 augusztusában CERN-ben magyar fizikatanároknak rendezett továbbképzés.

2006 januárjában a CERN körlevelet küldött a tagországaiába, amelyben nemzeti nyelven folyó egyhetes részecskefizikai továbbképzést hirdetett meg. Elsőként a magyarok reagáltak a kezdeményezésre, s ennek köszönhetően először a magyar nyelvű programot (HTP 2006) rendezték meg 2006. augusztus 20. és 26. között. A tanulmányút megszervezése *Sükösd Csaba* és *Jarosievitz Beáta* érdeme.

2006. augusztus 19-én a déli órákban autóbusszal (WEB-001 rendszámmal!) indultunk Budapestről. A fárastó buszozást megszakító első hosszabb megállást



Chillon vára

Salzburgban tartottuk, itt két órát töltöttünk esti városnézéssel. Láttuk *Christian Doppler* és *Mozart* szülőházát, a várat, és a város pezsgő éjszakai életét is.

Másnap már Svájcban ért bennünket a reggel. Az útvonalunk adta lehetőséggel élve délelőtt megnéztük (Montreux mellett) Chillon várát, amelyet egy hegyoldalból alakítottak ki a Genfi tó partján.

Közel egynapos autóbuszút után érkezünk a CERN meyrini campusába. Az intézet részéről *Mick Storr* köszöntött minket, és máris egy előadáson találtuk magunkat. *Vesztergombi György* mesélt a parkban kiállított buborékkamrákról, majd röviden bemutatta nekünk a CERN-t.

A CERN betűszó egy az intézet létrehozásával megbízott, 1952–54-ben fennállt átmeneti szervezet francia nevének (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) kezdőbetűit őrzi. Az intézet hivatalos (angol) neve *European Organization for Nuclear Research*, de a benne folyó tevékenység fő irányára utalva, gyakran használják a nem hivatalos *European laboratory for particle physics* elnevezést is, ennek a magyar megfelelőjét érdemes megjegyezni: *Európai Részecskefizikai Laboratórium*.

A CERN létrehozása európai válasz volt a Manhattan-programra. Míg azonban az amerikai program célja a háború megnyerése volt, a CERN-é a béke megnyerése lett. 1954-ben 12 ország kormánya alapította, jelenleg már 20 ország, köztük hazánk is (1992 óta teljes jogú), tagja. A Genf mellett felépült kutatóközpont évtizedek óta a részecskefizikai kutatások fellegvára. (A részecskefizika az anyag legparányibb építőköveit vizsgálja módszeres alapossággal.) Érdekes élmény volt, hogy itt minden „utca” fizikusokról van elnevezve. Naponta áthaladtunk az Einstein, Rutherford ... utcákon. A CERN mintául szolgálhat a társadalom egészének: minden kutatási eredmény nyilvános, mindent lehet fényképezni, mindenhol be lehet menni, ha az ott folyó munkát nem zavarja és nem káros az egészségre. Legújabb gyorsítójának, a „nagy hadron ütköztetőnek” (LHC) befejezéshez közeledő építését, annak minden fázisát a weben kamerával on-line és grafikonokon követhetik az érdeklődők.

CERN-i programunk egyik részét előadások jelentették, természetesen a modern részecskefizikáról.

Három alkalommal Vesztergombi Györgyöt hallgattuk, előadásainak címe *Gyorsítók és detektorok* volt. Egy modern nagyenergiájú részecskegyorsító működésének alap-

elve nagyon hasonlít a TV képernyője, illetve a számítógép (képcsöves) monitorja működéséhez, hiszen ez utóbbiak gyakorlatilag szintén részecskegyorsítók. A televízió képcsöve is tartalmazza azokat az egységeket, amit egy „igazi” részecskegyorsító: részecskeforrás, nyalábvezérlő és fókuszáló mágneses tér, céltárgy. Minden gyorsító az ion- vagy elektronforrással kezdődik, hiszen csak töltött részecskéket lehet gyorsítani, legkézenfekvőbb módon (sztatikus) elektromos térrel. A klasszikus katódsugárcsőben például körülbelül 20 kV-os elektromos tér gyorsít. (Sztatikus mágneses tér segítségével viszont nem lehet gyorsítani, a mágneses Lorentz-erő ugyanis merőleges a sebességre.) A gyorsítás során nyert energia a tömegtől nem függ, csak a gyorsított töltés és a gyorsító feszültség nagyságától. Ezért is tűnik természetes mértékegységnek az elektronvolt (eV). A modern részecskegyorsítóban a gyorsítást időben igen gyorsan változó, nagyfrekvenciás elektromos térrel hozzák létre. Így akár több száz MeV energiájú részecskék is előállíthatók.

Az egyik délután laborlátogatáson vettünk részt. Ott sikerült megörökíteni egy lineáris gyorsítót.

A nagyenergiájú gyorsítók egyik legmodernebb típusa a szinkrotron, amelyben rendkívüli precizitással szinkronizált mágneses tér (részecskéket körpályára kényszeríti) és elektromos tér (a részecskéket gyorsítja) kombinációjával hoznak létre nagyenergiájú részecskéket. Technikailag úgy képzelhető el, hogy adva van egy gyűrű, amelynek a kerülete mentén mágneses dipólokat helyezünk el. A dipólok tere merőleges a gyűrű síkjára és a térerősség 0 és  $B_{max}$  között szabályozható. A gyűrű nem egészen tökéletes kör, néhány helyen lineáris szakaszokat iktatnak be, ezekben lineáris gyorsítót helyeznek el. Minél nagyobb energiára (sebességre) tesz szert a részecske a lineáris szakaszokon, annál nagyobb mágneses térre van szükség ahhoz, hogy pályája a gyűrűben maradjon. Az épülő LHC sugara 3 km, az elérhető legnagyobb mágneses indukció 8,5 tesla. Így ebben a gyűrűben akár 7–8 TeV energiájú részecskék is előállíthatók lesznek majd.

A részecskéket az anyaggal való kölcsönhatásuk alapján tudjuk érzékelni, detektálni. Az 1960-as évekig optikai úton történt a részecskék észlelése fluoreszkáló ernyő, ködkamra, buborékkamra, emulziók segítségével. 1962-től vált lehetővé a gáztöltésű detektorok (GM-cső)

Lineáris gyorsító





és a félvezető detektorok jeleinek elektronikus feldolgozása, rögzítése. Mintegy tíz esztendeje kezdtek elterjedni a szilícium kamrák (pixel detektorok).

Az elemi részek rejtelmeibe, az atomtól a kvarkig, *Horváth Dezső* vezetett be minket. Összefoglalást kaptunk a részecskefizikában meglévő szimmetriák és megmaradási tételek között. A mai részecskefizika nagybetűs „Elmélete”, a Standard Modell az 1970-es évek óta ismert. Pontos matematikai formalizmuson alapul, melyben szereplő minden fizikai fogalom elvben pontosan mérhető mennyiség. A részecskefizika legkeresettebb szereplője a Higgs-bozon, a Standard Modell hiányzó láncszeme. Az „Elmélet” szerint léteznie kell, de kísérletileg még nem sikerült megfigyelni. Az LHC-n jövőre kezdődő kísérletek során talán észlelhető lesz a Higgs-bozon, s ezzel a Standard Modell bizonyítottá válhat.

A részecskefizikai mérések során hihetetlen mennyiségű műszert, berendezést kell összehangoltan működtetni, ezért komoly technikai fejlesztéseket eredményez.

*Trócsányi Zoltán* a kozmológia alapjaival ismertett meg bennünket. *Einstein* általános relativitáselmélete mérföldkő a tudomány történetében. Ebből az elméletből kiindulva *Friedman* orosz fizikus talált először nem stationárius megoldást a Világegyetemre. A modern kozmológia *Hubble* megfigyelésével kezdődött, mely szerint a galaxishalmazok távolodnak egymástól. A távolodási sebesség egyenesen arányos az egymástól mért távolságukkal. Ez a megfigyelés az egyik bizonyítéka az Ősrobbanás (Big Bang) elméletnek. Egy átlagos galaxis úgy mozog, mint a feldobott kő. Ha elegendő az energiája, a végtelenbe távozik. Ha nem, akkor emelkedik, megáll, visszaesik. Ha lenne statikus megoldása a gravitációs egyenleteknek, a statikus Világegyetem olyan lenne, mint a lebegő kő.

Több kozmológiai kérdésre is a részecskefizika adhat választ. Miért kritikus a Világegyetem sűrűsége? Honnan származik az anyag? Ha kezdetben anyag és antianyag ugyanannyi volt, akkor valami miatt ez a szimmetria megsérült. A Világegyetem tágulásával az anyag és antianyag elektromágneses sugárzássá alakult át, és visszamaradt egy kevés anyag (kb. egymilliárd fotonra jut egy proton). Mi a kezdeti aszimmetria oka? Mi a Világegyetem finomszerkezetének forrása? Mi a sötét anyag?

*Debreczeni Gergely* a számítástechnika CERN-beli alkalmazásának történetét foglalta össze nagyszerűen. 20. század közepén *Wim Klein* képes volt egy 133 szám-

Kellékek a ködkamra építéséhez



gyéből álló szám 19-ik gyökét fejben meghatározni. Egyszerű matematikai műveletekben jóval gyorsabb volt kora számítógépeinél. 1958-ban jelent meg az első valódi „nagyszámítógép” a CERN-ben, a Mercury. Ennek még mágnesszalagos memóriája volt. Az 1960-as évek végén tűnt fel a mai internet őse, összekapcsolt számítógépek rendszere. (A név az „interconnected networks” kifejezésre utal.) A kapcsolat lényege nem a kábel- vagy rádiókapcsolat, hanem a közös nyelv (protokoll). A tudományos kutatásban rendkívül fontos az információ és az ötletek szabad áramlása, elérhetősége, főleg egy annyira komplex tudományterületen, mint a részecskefizika. Talán ezért nem véletlen, hogy az 1990-es évek elején *Tim Berners-Lee* ötletként a CERN-ben fejlesztették ki a World Wide Webet (WWW), ami csak egy az internet szolgáltatásai közül. Segítségével információt oszthatunk meg, tehetünk nyilvánossá. A becslések szerint ma több mint 1 milliárd ember használja a webet. Bár véletlen volt a buszválasztás, de a rendszáma (WEB-001) kötődött a CERN-hez. A tudományos, műszaki, diplomáciai és hétköznapi élet ma már elképzelhetetlen a web nélkül.

A grid egy másik, a webhez hasonlóan az internetre épülő szolgáltatás. Viszont a gridhez kapcsolt számítógépek és eszközök nemcsak információt osztanak meg egymás között, hanem tárterületet is! Számos grid létezik a világban különböző feladatoknak szentelve: vállalati, önkéntes tudományos, nemzeti gridek. Hogy miért van a gridre szükség a CERN-ben? Az LHC kísérletek 10–15 millió gigabyte (kb. 20 millió CD) adatot termelnek majd évente. Ennek feldolgozása napjaink leggyorsabb asztali processzoraiból mintegy 100 000 darabot igényelne. Ezt nem lehet egy helyre bezsúfolni, így számos együttműködő, összekapcsolt számítóközpontra van szükség.

*Soós Csaba* a majdani gyorsítónál, az LHC-nél tervezett kísérletek szolgáló egyik óriásdetektor, az ALICE számára végzett elektronikai fejlesztésekről tartott számunkra előadást. Nagyenergiájú részecskék ütköztetésekor sok-sok újabb részecske keletkezhet. A detektorokra ekkor van szükség, hiszen velük lehet a keletkező részecskék által hagyott „nyomok” helyét, idejét, amplitúdóját (energiáját) rögzíteni. Ez után a begyűjtött rengeteg adat feldolgozása történik. Megdöbbentő a pozicionálás fontossága, hiszen ha például 27 km-es távolságon mikrométeres, vagy még nagyobb pontossággal kell célba találni, akkor még az árapályhoz hasonló kéregmozgás, vagy a Föld görbülete is hibát jelenthet.

*Fodor Zoltán* mellett, hogy a nehézion-fizika alapjaival ismertett meg minket, a laboratóriumában (NA49) betekintést nyújtott abba, hogyan dolgoznak a kísérleti fizikusok. Ez a helyszín Franciaország területén helyezkedik el. Érdekes volt kezünkbe venni a 70-es években használt mágnesszalagos kazettát (a ma használatos videokazettánál kb. háromszor nagyobb).

Egyik délután előkészített eszközökből magunk építettünk ködkamrát, mellyel kozmikus sugarak útját figyeltük meg.

Egy alkalommal vendéglátónk, Mick Storr meglepetést készített. Rengeteg szó esett arról, hogy mennyi Nobel-díjas fizikus jár-kelel a CERN-ben – ezért megszervezték



A Nobel-díjas Jack Steinberger Horváth Dezsővel

nekünk egy találkozót *Jack Steinberger*rel (Nobel-díj 1988). Leírhatatlan élmény volt, ahogy szerényen, egyszerű öltözékben ez a nagy fizikus ott megjelent, és beszélt a fizika jövőjéről, az oktatásról, kiemelve a kvantummechanika fontosságát.

Találkoztunk a CERN főigazgatójával *Robert Aymar*ral is, aki sokat segített a kinti programjaink megvalósításában. Kedvesen válaszolt az általunk feltett kérdésekre, mi pedig megköszöntük, hogy elsőként hallgathattunk részecskefizika témájú előadásokat anyanyelvünkön a CERN-ben.

Ezek a találkozások számunkra azért is voltak meghatározók, mert ahhoz vagyunk szokva, hogy a hazai „felsőbb-ség” képviselői többnyire arra sem méltatják a tanárokat, hogy meghallgassák őket. A Tanári Anketók fórumaira küldött, általában nem túl magas rangú beosztottak az ismert szövegeket elmondva gyorsan elsietnek, sürgős dolgukra hivatkozva. A CERN főigazgatójának volt ideje egy kis kelet-európai ország fizikatanáira, meghallgatni kérdéseiket, türelmesen válaszolni nekik.

A sok tartalmas, érdekes szakmai elfoglaltság mellett jutott idő kulturális programra is. Genf városával játékos módon ismerkedtünk meg. A „kincsvadászatra” négy csapatot hoztunk létre, s az útmutató segítségével bejártuk az egész belvárost. Láttuk *Rousseau* és *Sissy* szobrát, megcsodáltuk a sok nemzetközi szervezet székházát, parkokat, napórákat a házak falain. A Reformátorok Falán (Kálvin és három társa) örömmel fedeztük fel *Bocskai István* szobrát. Utunk során végig a híres szökőkút látványa kísért bennünket.

Az egyik nap délutánján Bernbe utaztunk, hogy megnézzük a multimédiás Einstein-kiállítást. Aki ügyes volt, egy rövid kört is tehetett a belvárosban, s akár Einstein lakóházát is láthatta.

Hazafelé – kis kitérővel – a *Mont Blanc* felé indultunk, és *Chamonix*-ból kötélpályán egy 3842 m magasban levő kilátóra jutottunk.

Ha sok fizikatanár együtt van, nemcsak szívesen beszélget a fizikáról, tanításról, hanem ha lehetőség van, szívesen végez kísérletet, illetve mér. Útközben több helyen is regisztráltuk a radioaktív háttérsugárzást, végeztünk földrajzi helymeghatározást egyszerű eszközzel,



Szivárvány a genfi szökőkútnál

mértük a víz forráspontját különböző tengerszint feletti magasságokon, és elvégeztük *Torricelli* kísérletét még a *Mont Blanc* tetején is. Ezekről a mérésekről egy következő cikkben részletesebben is szó lesz.

Az egyhetes tanulmányút célja az volt, hogy a részecskefizika és a kozmológia alapjaival megismertesse a középiskolai tanárokat. A fizikának ezek a fejezetei, amelyeket az idősebb tanárkollégák képzésük idején az egyetemen éppen csak érintettek, a 20. század második felében igen nagy fejlődésen mentek át, és egészen biztos, hogy a 21. században is a kutatások frontvonalában lesznek. A CERN-ben eltöltött egy hét nemcsak azért volt hasznos, mert olyan tudás birtokába kerültünk, amit magabiztosabban tudunk átadni tanítványainknak, hanem azért is, mert motivációt, kedvet kaptunk további otthoni tanuláshoz. Nekünk fizikatanároknak igazán nagy élmény volt az iskola hétköznapi, megszokott életéből egy hétre kilépni, bepillantást nyerni, hogyan dolgoznak az „igazi” fizikusok. Biztos, hogy a fizika iránti lelkesedésünket, jókedvünket magunkkal visszük a tantermekbe, tanítványaink örömeire. Köszönjük ezt a fantasztikus egy hetet a szervezőknek (*Mick Storr*, *Sükösd Csaba*, *Jarosievitz Beáta*), valamint az előadóknak (*Debreczeni Gergely*, *Horváth Dezső*, *Fodor Zoltán*, *Soós Csaba*, *Trócsányi Zoltán*, *Vesztergombi György*).

Torricelli-kísérlet Európa tetején



## SCIENCE ON STAGE PÁLYÁZATI FELHÍVÁSA

A *Science on Stage* nemzetközi program hazai szervezőbizottsága pályázatot hirdet természettudományi szakos középiskolai tanárok részére

## HOGYAN TANÍTANÁM?

címmel, tetszőlegesen kiválasztott, legalább két középiskolai tárgy (fizika, kémia, biológia, földrajz) tananyagát érintő interdiszciplináris téma didaktikai feldolgozására.

A pályaművek elvárt terjedelme 7–10 oldal.

Beküldési határidő: 2006. december 15.

A pályaműveket lehetőleg elektronikus úton (.doc, .rtf vagy .pdf formátumban) a mail.elft@mtesz.hu címre, a levél tárgyaként a „Science on Stage pályázat” szöveget feltüntetve kérjük eljuttatni. Postai beküldés esetén a cím: Eötvös Loránd Fizikai Társulat, 1371 Budapest, Pf. 433.

Díjazás: A legjobb pályamunka beküldője 30 eFt értékű könyvutalványban részesül. Második és harmadik díj: 20 eFt, illetve 10 eFt értékű könyvutalvány.

*Kovách Ádám*

a program hazai koordinátora

## KÖNYVESPOLC

## WIGNER JENŐ VÁLOGATOTT ÍRÁSAI

Szerk. Ropolyi László, Typotex Kiadó, Budapest, 2005. 461 o.

A mai magyar fizikusnemzedék egy jó része hallotta *Wigner Jenőt* személyesen is előadni Magyarországon, hiszen 1976-tól kezdve négyszer is hazalátogatott (legutóbb 1987-ben). Számos írását magyar nyelven is lehetett már olvasni részben a *Fizikai Szemlében*, részben egy a mostanihoz hasonló kötetben, amelyet a Gondolat Kiadó jelentetett meg 1972-ben. (A tanulmányok mintegy fele azonos a két kiadványban.) A most megjelent cikkgyűjtemény a Kiadó *Principia Philosophiae Naturalis* című sorozatának – amelyben korábban például *Newton*, *Planck* írásai jelentek meg – egyik kötete.

Bár Wigner Jenő már huszonevésen végleg elhagyta Magyarországot, magyarul élete végéig jól beszélt, sőt előadott. Magyar gyökereit soha nem tagadta meg, amint erről a kötetben megjelent nem egy írása tanúskodik. A Nobel-díjat 1963-ban kapta meg „hozzájárulásáért az atommag és az elemi részecskék elméletéhez, különösképpen a fundamentális szimmetriák felfedezéséért és alkalmazásáért”.

Anélkül, hogy a könyv formálisan fejezetekre tagolódna, a majdnem húsz tanulmány három csoportba sorolható tárgyköre szerint. Az első a szimmetria és invariancia problematikájával, a második a kvantummechanikával és értelmezésével, míg a harmadik a fizika és a tudomány alapvető kérdéseivel foglalkozik filozófiai megközelítésben. Az utóbbiak közé tartozik a *Neumann János*ról és a *Szilárd Leó*ról írt nekrológ is. A három csoportot megelőzi a tanulmányok válogatását végző *Ropolyi László* tartalmas előszava.

A tanulmányok nagyobbik része aligha mondható ismeretterjesztőnek. Bennük bőven találkozunk a matematikai megközelítéssel annak megfelelően, hogy szerzőjük – *Galilei*hez hasonlóan – hangsúlyozza, hogy a természettörvények a matematika nyelvén vannak megírva. (A szóban forgó írások tudományos jellegét mutatja eredeti megjelenésük helye is: például *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vagy *American Journal of Physics*.) Még a viszonylag népszerűbb cikkekben (a tanulmányok harmadik csoportjában) is érvényesül az elméleti fizikus, pontosabban a matematikai fizikus precíz fogalmazása.

Világlátásának alapjait jellemzik a következő idézetek. „A mechanisztikus és – általánosabban – a makroszkopikus fizika és kémia briliáns sikerei elhomályosították azt a nyilvánvaló tézist, hogy a gondolatok, vágyak és érzelmek nem anyagból vannak...” Szerinte: „...a legtöbb fizikus ... a gondolkodást, az értelmet, a szellemet ismeri el elsődlegesnek”. „... eltűnődhetünk, miként fogadhatta el a materializmust – a tant, mely szerint »az élet a fizikai és kémiai törvények bonyolult kombinációjával magyarázható« – oly hosszú időn keresztül a természetkutatók többsége”.

Igen tömören fogalmazza meg a tudomány és a fizika mibenlétét. E szerint, szabadon idézve, *a tudomány összefüggések rendszere a jelenségek bizonyos körére vonatkozóan, a fizika célja pedig az univerzális természet-törvények felkutatása*.

Wigner a legkevésbé sem optimista a fizika jövőjével kapcsolatban. Szinte megdöbbentő ma olvasni előre

lító sorait, amelyeket 1950-ben írt le. „...a fizikát magunk mögött fogjuk hagyni az útfélen...” „A fizika szakot végzettek száma csökkenni fog, és a tudomány drasztikusabban tolódik majd el új területek felé, mint azelőtt: a divattá vált új tudományszak nem öleli fel ugyanúgy a fizikát, ahogy a kvantumelmélet a klasszikus fizikát felöleli.” A jóslat – úgy tűnik – fél évszázad múltán kezd beteljesülni.

Wigner „próféciai” magával a tudomány egészével sem sokkal „kegyesebbek”: „...tudományunk sikere jobb ab-

ban, hogy hatalmat ad a kezünkbe, mint abban, hogy az ember számára *igazán fontos tudást* (a recenzens kiemlése) nyújtson nekünk”. „...a tudományos munkásság vonzereje, melyet jelenleg az ifjú lelkekre kifejti, csökkenni fog. A tudomány valami egészen más lesz, kevésbé káprázatos. Azt a csodálatos győzelmi mámort, amelyet jelenleg mi, tudósok átélünk, és amely értelmünk hatalmának újonnan megismert érzéséből ered, némileg tompítani fogja e hatalom határainak felismerése.”

Berényi Dénes

## HÍREK – ESEMÉNYEK

### AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

#### Elhunyt Zimányi József akadémikus

2006. szeptember 26-án, alig néhány hónappal 75-ik születésnapja előtt tragikus hirtelenséggel meghalt *Zimányi József* akadémikus, a Központi Fizikai Kutató Intézet Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézet professor emeritusa, haláláig az intézet Tudományos Tanácsának elnöke.

Zimányi József halála a hazai és nemzetközi fizikus

közösség számára egy iskolateremtő tudós és a tudományos közösség szakmai érdekeinek képviselőjére mindig kész ember elvesztését jelenti.

A Magyar Tudományos Akadémia és a KFKI RMKI saját halottjának tekinti. Temetése október 20-án 12<sup>45</sup>-kor lesz a Farkasréti temetőben.

### HÍREK ITTHONRÓL

#### Örökségvédelmi napok

Mintegy 500 műemléki épület és 47 kulturális séta várta az érdeklődőket országsháza a Kulturális Örökség Napjai rendezvénysorozat keretében az egyik szeptemberi hétvégén. Az immáron tízéves múltra visszatekintő esemény idei kiemelt témája a félmúlt építészet volt. A látogatók megtekinthették a szocialista realizmus stílusjegyeit magukon viselő épületeket, többek között ellátogathattak a szocializ-

mus városépítészetének és iparának „fellegváraiba”: Ózdra, Miskolcra, Diósgyőrré, Komlóra, Salgótarjánba, Dunaújvárosba, Pécs Uránvárosába és a budapesti Csepel Művekbe. Megnyitotta kapuit Pakson a radioaktív hulladékkezelő, a KFKI egyik épületében lévő kutatóreaktor, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem oktatóreaktora és az Országos Atomenergia Hivatal épülete is.

#### Elkezdődött az Energia Suli

Játékosan tanulhatnak, sőt, akár MP3 lejátszót nyerhetnek azok a játékos kedvű általános iskolások, akik bekapcsolódnak az ELMŰ és az ÉMÁSZ Energia Suli programjába. A cél, hogy felhívják a gyermekek figyelmét a környezetvédelemre és az energiatakarékosságra.

Szeptember közepéig az ország összes általános iskolájába elküldték azt a színes reklámanyagot, amelyből minden tanuló tájékozódhat az interneten elérhető Energia Suliról. Az Energia Suli honlapján három korcsoportnak

kínálnak érdekességeket: a 6–10 év közöttieknek, a 11–15 éveseknek, valamint a szülőknek és a tanároknak. Az általános iskolások egy különleges pályázatra is benevezhetnek: a *Ragasztgatás majomszokás* arra biztat mindenkit, hogy járjon nyitott szemmel a lakókörnyezetében, és kapja lencsevégre azt a villanyoszlopot, amelyet leginkább elcsúfítottak különféle plakátokkal. A leginkább teleragasztott villanyoszlopokat bemutató fotókat az interneten is lehet majd látni, sőt a beküldők között november

elején értékes nyereményeket sorsolnak ki. A fődíj egy digitális fényképezőgép lesz, ezért már igazán érdemes nyitott szemmel járni! Az internetes honlapon emellett érdekes tananyagot, tudástesztet, energiatotót, programajánlót és játékokat is találhatnak az érdeklődők.

Elterjedt vélemény, hogy az emberek többsége egyáltalán nem érzékeli, mennyi energiát használ fel. Az Európai Unió 2020-ra 20 százalékkal kívánja csökkenteni az

energiafelhasználást, ennek elérésében nagy szerepe lehet a fiatal korosztálynak.

Hazánkban már most is van olyan iskola, amelyik élen jár az energiával való takarékoságban és a környezetvédelemben. A budapesti Kék Általános Iskola több európai uniós pályázatban is részt vesz, együtt dolgozik több külföldi iskolával, nemrég pedig elnyerte az *Öko-Iskola* címet.

## Kutatók éjszakája

Az „Európai Kutatók Éjszakája” keretében Európa-szerte egyszerre zajlottak a tudományos kutatást népszerűsítő programok. A hazai rendezvények iránt érdeklődőket szeptember 22-én Budapesten és Győrben várták kora reggeltől késő estig izgalmas, különleges programokkal, előadásokkal a szervezők: a Mindentudás Egyeteme Tudományos Kht., a Tempus Közalapítvány, az Eötvös Loránd Tudományegyetem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem és a Széchenyi István Egyetem.

A program megtekinthető a [www.kutatokejszakaja.hu](http://www.kutatokejszakaja.hu), esemény honlapon, néhány a rendezvények közül:

– látogatás a budapesti Műegyetem repülésszimulátor laboratóriumában;

– kirándulás a Szemlőhegyi barlangba, illetve a Lukács fürdőbe a barlangok és a termál vizek létrejöttének titkait bemutató *Budapest földalatti világa* című program részeként;

– vetítéssel egybekötött előadás *Természeti katasztrófák a médiában és a filmekben* címmel;

– szabadtéri csillagászati program Győrben, amelynek során tudományos kísérlet választotta a látogatóknak arra a kérdésre, hogy valóban mozog-e a Föld.

## Regionális diákköri konferencia

A Tudományos Diákkörök Országos Konferenciáját (TUDOK) megelőzően a közép-magyarországi, budapesti valamint szlovákiai régió konferenciája, a TUDOK2006 december 1-jén és 2-án kerül megrendezésre a Szent Margit Gimnáziumban (Budapest XI., Villányi út 5–7.). A konferenciával kapcsolatos legfontosabb információ-

kat a (<http://www.tudok2006bp.try.hu>) weboldalon lehet elolvasni.

A rendezők kérik a tisztelt Olvasókat, hogy tanítványaik, ismerőseik körében, szűkebb-tágabb környezetükben hívják fel erre a rendezvényre a figyelmet, hogy minél több tehetséges diák munkáját ismerhessék meg.

## HÍREK A NAGYVILÁGBÓL

### A Jaguár sebessége túlszárnyalta az 50 teraflopot

Az USA-beli Oak Ridge Nemzeti Laboratórium Cray-XT3 típusú szuperszámítógépének korszerűsítése során a gép sebességét sikerült 54 teraflop, azaz másodpercenként 54 billió műveletre növelni, így ez lett a világ egyik legnagyobb kapacitású számítógépe. A Jaguár becenevű számítógép jelenleg a legnagyobb, amely részt vesz az Energiaügyi Minisztérium *Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment* nevű kutatási programjában. A rendszer minden kutatónak és kutatási szervezetnek a ren-

delkezésére áll majd, beleértve az ipari alkalmazásokat is. (Három nagy ipari óriás – a Boeing, a DreamWorks Animation és a General Atomics – is adományokkal járult hozzá 2006-ban az Oak Ridge-i laboratórium kutatási programjához.) Az új, korszerűsített rendszer alapvető fontosságú lesz például a fúzióenergia-kutatások területén, és olyan, rendkívüli kihívást jelentő tudományos problémák vizsgálatánál, mint a klímaváltozás modellezése.

<http://www.ornl.gov>

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [mail.elft@mtesz.hu](mailto:mail.elft@mtesz.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített adószámán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 700.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

## Az EXO Projekt

Fizikusok egy csoportja hamarosan egy sóbánya mélyén fog dolgozni, hogy meghatározza a neutrínók pontos tömegét, valamint meggyőződjön arról, hogy azok saját antirészecskék-e. (Azaz, hogy a Majorana- vagy a Dirac-egyenlet írja-e le őket.) A Dúsított Xenon Obszervatórium (Enriched Xenon Observatory, EXO) projekt keretében a Stanford Egyetem által vezetett együttműködés kutatói Új-Mexikó állam egy sóbányájában, 800 méter mélyen helyezik el detektorrendszerüket.

Ennek legfontosabb része egy különleges réztartály, benne 200 kilogrammnyi, a 136-os tömegszámú izotópot feldúsítva tartalmazó xenonnal. A kutatók azt remélik, hogy, ha létezik, képesek lesznek megfigyelni a xenon 136-os izotópjának neutrínómentes kettős béta-bomlását,

amelynél a xenon két elektron kibocsátásával bomlik el. Ez a folyamat csak akkor következhet be, ha a neutrínó egyben saját antirészecskéje is (azaz, ha Majorana-részecske).

A mérést különösen nehezíti az, hogy csak a xenon bomlásánál keletkező neutrínókat (illetve, ezek hiányát) akarják detektálni, nem pedig a kozmikus sugárzásból vagy egyéb radioaktív szennyezésekből származókat. Ez az oka annak, hogy az alacsony háttér eléréséhez a detektorrendszert egy sóbánya mélyén kell elhelyezni. A különleges réztartályt Németországban készítik, majd egy teherhajó mélyén szállítják Stanfordba, hogy elkerüljék egy repülőút során esetleg keletkező radioaktív szennyezéseket.

<http://www.slac.stanford.edu>

## Világrekord nagyságú mágneses térerősség

A Los Alamos Nemzeti Laboratórium mágneses laboratóriumában épített berendezéssel minden eddigénél nagyobb mágneses térerősséget sikerült létrehozni. Augusztus folyamán felszerelték az itt tervezett és megépített nagy mágnes külső tekercsét, amely a beszabályozás során 35 tesla értékű mágneses térerősséget hozott létre minden eddigénél nagyobb térrészben, a tekercs 225 milliméter átmérőjű belsőjében. Ilyen nagy térerősséget eddig nem sikerült ronszolásmentes technikával elérni. Ezt a rekordot hamarosan követte egy újabb: a berendezés működési határainak vizs-

gálata során 10 alkalommal is – meghibásodás nélkül – elérték a 80 tesla térerősséget. Az eredmények reményt adnak a 100 tesla térerősség elérésére.

Ha teljesen elkészül, a mágnes hét tekercs kombinációja lesz, amelynek össztömege majdnem 9 tonna, energiaellátásáról pedig egy 1200 megajoule teljesítményű generátor gondoskodik majd. Teljes üzemben több száz milliszekundum időtartamokra lesz képes minden eddigénél nagyobb mágneses térerősséget kelteni.

<http://www.lanl.gov/news>

### MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

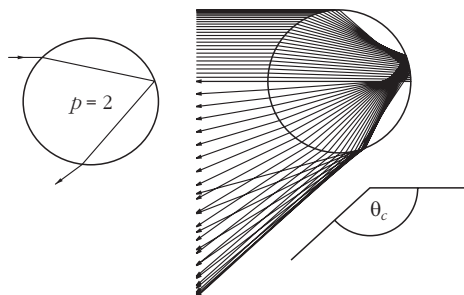
## FIZIKUS SZEMMEL A SZIVÁRVÁNYRÓL

Esős nyári délutánon a ragyogó Nap fényében gyakran látható egy, esetleg két színes ív az égbolton, a jól ismert szivárvány. Nemcsak festőket, költőket ihlette meg, de a természettudósokat is régóta izgatta e gyönyörű légköri jelenség. A századok alatt, az optika tudományának fejlődésével párhuzamosan egyre tökéletesebb elméleteket dolgoztak ki a fizikusok a szivárvány értelmezésére.

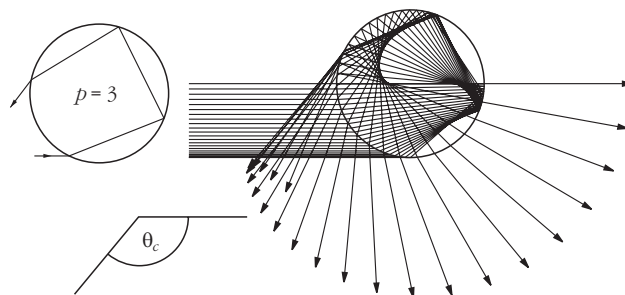
Mielőtt részletesebben áttekintenénk ezeket az elméleteket, szóljunk néhány szót a szivárvány keletkezésének alapvető vonásairól. A szivárványt akkor láthatjuk, ha az előttünk hulló esőcseppekre a mögöttünk lévő Nap rásüt. Alakja körív, két fő íve figyelhető meg: a *főszivárvány* és a halványabb *mellékszivárvány*. A főszivárványban a belső körív kék, míg a külső vörös színű. A mellékszivárványban a színek sorrendje fordított, a belső körív vörös, a külső kék. Alaposabb megfigyelésekből kiderül, hogy a

szivárvány két íve közti tartomány jelentősen sötétebb, mint az ég más része. Ezt a sötét sávot az ókori *Aphrodisias Alexander* tiszteletére, aki Kr. e. 200-ban figyelte meg ezt a jelenséget, *Alexander-féle sötét sávnak* nevezik. Az interneten több helyen is találhatunk fényképeket a szivárványról és más légköroptikai jelenségekről [1]. A főszivárvány alatt ritkán további *járulékos íveket* láthatunk (angolul *supernumerary arcs*). Egy róluk készült kitűnő felvétel [2] internetcímen található. Mint látni fogjuk, ezen járulékos ívek magyarázata alapvető szerepet játszott a szivárvány pontosabb elméletének kidolgozásában.

Már az ókori világ természettudósait is foglalkoztatta a szivárvány értelmezése. *Arisztotelész* még úgy vélte, hogy a szivárvány a napfény felhőkön történő visszaverődésének a következménye. De arab tudósok is jelentős eredményeket értek el az optikai kutatások terén, köztük *Ibn*



1. ábra. A vízszintesen balról beeső fénysugarak menete főszivárványnál (a húrok száma  $p = 2$ ).

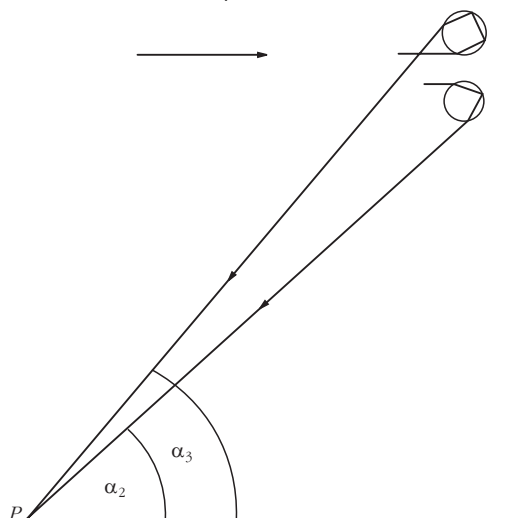


2. ábra. A vízszintesen balról beeső fénysugarak menete mellékszivárványnál (a húrok száma  $p = 3$ ).

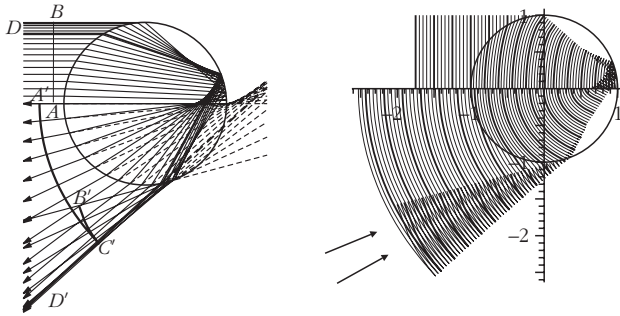
*al-Haitbam*, csillagászként *Albazen* néven is ismert. Szerinte a nedves és sűrű levegő gömb alakú tükörként veri vissza a napsugarakat [3]. A szivárvány ívének szögét elsőként *Roger Bacon* mérte meg 1266-ban. Eredményei szerint a főszivárvány esetében a szivárvány ívének egy pontjából a Nap felé és a megfigyelő felé mutató irány  $42^\circ$ -os szöget zár be. Mellékszivárványra ez a szög  $50^\circ$ . Csak 17 évszázaddal *Arisztotelész* után adott pontosabb magyarázatot a jelenségre *Freibergi Theodorich* német szerzetes. Kísérleteihez vízzel töltött üveggömböt használt, és megfigyelte a szivárványt létrehozó fénysugarak menetét. Három évszázadon át elfelejtették *Theodorich* eredményeit. 1637-ben *René Descartes* mutatta meg újra, *Theodorichtól* függetlenül, hogy a főszivárvány keletkezésénél a fény először megtörik a vízcsepp felületén, majd annak belső felületén *egyszer* visszaverődik, és aztán ismételt fénytöréssel kilép belőle. Mellékszivárványnál a vízcseppben belül *két* visszaverődés történik. *Theodorich* és *Descartes* megállapították, hogy a szemünkbe érkező különböző színű fénysugarak különböző vízcseppekből jönnek.

A szivárvány megértésében kulcsfontosságúnak számító elméletek, a fény természetének pontosabb megismerésének megfelelően, három fő témakörhöz csoportosíthatók: (i) *Descartes* geometriai optikán alapuló elmélete, (ii) a fény hullámtermészete, (iii) a *Maxwell*-egyenletek alapján kidolgozott *Mie*-elmélet. A továbbiakban áttekintjük a fenti elméletek alapjait.

3. ábra. A  $P$  megfigyelőhöz érkező legintenzívebb fénysugarak iránya a beeső vörös színű fény irányához viszonyítva  $\alpha_2 = 42,5^\circ$ -os és  $\alpha_3 = 50,1^\circ$ -os fő- és mellékszivárványnál.



A szivárvány egységes geometriai optikai értelmezése *Descartes* nevéhez fűződik. *Descartes* geometriai optikai magyarázatához a ma már jól ismert, *Snellius–Descartes-törvénynek* is nevezett töréstörvényt alkalmazta, amely szerint a levegőből  $\alpha$  beesési szöggel érkező fénysugár iránya megtörik, ha egy másik közeg (pl. víz) határához érkezik. Az  $\alpha$  beesési szög és a megtört sugár  $\beta$  törési szögére a következő egyenlet teljesül:  $\sin\alpha/\sin\beta = n$ , ahol  $n$  az anyag törésmutatója, ami a fény levegőben és közegben mért terjedési sebességének az arányával egyezik meg. A Nap fénye közel párhuzamosan érkezik az esőfelhőben lévő vízcseppek felületéhez. Egy fénysugár menete egyszeres belső visszaverődés esetén az 1. ábra bal oldali részén látható (a belső visszaverődések száma helyett az irodalomban szokásos módon, a vízcseppben belüli húrok  $p$  számát adtuk meg). *Descartes* nagy türelemmel, körzővel és vonalzóval, illetve a *Snellius–Descartes-törvényt* felhasználva szerkesztette meg közel száz párhuzamosan beeső fénysugár menetét. Ma már könnyen írhatunk olyan számítógépes programot, amellyel ezt a feladatot gyorsan megoldhatjuk. Az eredmény a 1. ábra jobb oldali részén látható. A vízcseppből kilépő fénysugarak irányát jellemezhetjük a  $\theta$  szórási szöggel, ami a belépő és kilépő sugár közti szög. Az 1. ábrából szembejövő, hogy a vízcseppből kilépő összes fénysugár  $\theta$  szórási szöge *nagyobb* egy kritikus  $\theta_c$  szögnél. A  $\theta_c$  szög csak a víz  $n$  törésmutatójától és a húrok  $p$  számától függ [4]. Ezt a speciális sugármenetet *Cartesius-sugármenet* nevezzük. Jól látható az 1. ábrából, hogy a *Cartesius-sugármenet* közelében beeső párhuzamos sugarak a vízcseppből kilépve közel párhuzamosak maradnak, a nyaláb ebben az irányban a legintenzívebb [4]. Más esetekben a nyaláb a vízcseppből kilépve szétszóródik. Így a *Cartesius-sugármenetnek* kitüntetett szerepe van. Pontos matematikai számításokkal megmutatható, hogy a főszivárványt a bejövő fénysugár irányához képest  $\alpha_2 = 180^\circ - \theta_c(p=2) = 42,5^\circ$  irányból látjuk legintenzívebbnek vörös színű fényre (azaz  $n = 1,330$  törésmutatóval számolva) [4]. Hasonló módon alakul ki a halványabb mellékszivárvány, amikor a vízcseppben belül *két* visszaverődés történik (a húrok száma  $p = 3$ ). Ekkor a balról párhuzamosan beeső sugarak a 2. ábra szerint egy kritikus  $\theta_c(p=3)$  szögnél *kisebb* szórási szöggel lépnek ki a vízcseppből (megjegyezzük, hogy  $\theta_c(p=3) < \theta_c(p=2)$ ). A mellékszivárványt a bejövő fénysugár irányához képest  $\alpha_3 = 180^\circ - \theta_c(p=3) = 50,1^\circ$  irányból látjuk legintenzívebbnek vörös színű fényre (azaz  $n = 1,330$  törésmutatóval számolva) [4].



4. ábra. A bal oldali ábra mutatja, hogyan változik a kezdeti  $AB$  egyenes síkú hullámfront alakja egy bizonyos idő elteltével ( $A'C'B'$  görbe). A  $D$  és  $D'$  pontokon átmenő vastag vonal a Cartesius-sugármenetet jelöli. A jobb oldali ábra a hullámfront időbeli fejlődését mutatja. A nyílak irányában látjuk az első két járulékos ívet.

A fentiek alapján már könnyen megérthetjük, hogy miként alakulnak ki a szivárvány ívei. A 3. ábra az esőfelhő két különböző helyén lévő vízcseppben a Cartesius-sugármenetet mutatja vörös színre a fő- és a mellékszivárványnál. Mint láttuk, ezekből az irányokból érkezik az esőcseppekről a legintenzívebb fény egy távoli  $P$  megfigyelőhöz. Ha a cseppből kilépő Cartesius-sugár egyenesen a  $P$  pont körül úgy forgatjuk el, hogy közben az egyenes mindig  $\alpha_2$ , illetve  $\alpha_3$  szöveget zárjon be a bejövő fény irányával (a 3. ábrán vízszintes vonal), akkor az egyenes egy kúppaláston mozog, és a cseppekből induló végpontja egy körívet ír le, amely a szivárvány íve adott színű fénysugárra. A víz törésmutatója függ a fénysugár színétől, ezért az  $\alpha_2$  és  $\alpha_3$  szögek nagysága is. Egyszerű számítások szerint főszivárványnál  $\alpha_2$  vörös színre nagyobb, mint kék színre, így a külső ív vörös, a belső kék színű, ahogy ezt a természetben megfigyelhetjük. Mellékszivárványnál a számítások szerint a színek sorrendje, a megfigyelésekkel összhangban, fordított a főszivárványhoz képest [4]. Megmutatható, hogy a  $42,5^\circ$ -os és  $50,1^\circ$ -os szögek közti irányban (a fő- és mellékszivárvány között) egy sötét tartomány alakul ki, az Alexander-féle sötét sáv [4].

A továbbiakban a szivárványnak a fény hullámtermészetén alapuló elméletét ismertetjük. Közismert a fénynek a hullámtermészetéből fakadó két alapvető tulajdonsága: a polarizálhatósága és az interferencia-képessége. A szivárvány jelenségének jobb megértésében nem tekinthetünk el a fény e két tulajdonságától. A vízcseppeken megtörő fény polarizálódik, és így a szivárványról érkező fény síkban poláros. A fény polarizációjáról bővebben *Härtlein Károlynak* a *Mindentudás az iskolában* sorozat 2006. márciusi számában megjelent cikkét, illetve e cikk szerzőjének korábbi tanulmányát [4] javasoljuk az érdeklődő olvasó számára.

Időnként a főszivárvány belső köríve alatt járulékos íveket is megfigyelhetünk, amelyekre pontos matematikai elméletet elsőként *George Biddell Airy* adott 1838-ban. Röviden tekintsük át az elmélet főbb gondolatát! A vízcseppre különböző beesési szöggel érkező „fénysugarak” azonos idő után különböző utat tesznek meg. Ezért a 4. ábra bal oldalán látható, a bejövő fénysugarakra merőleges síkú  $AB$  hullámfront a vízcseppből kilépve már nem lesz sík. Kiszámítottuk, hogy a vízcseppben való áthaladás után miként torzul a hullámfront, az eredményt

a  $A'C'B'$  görbe mutatja. Látható, hogy a hullámfront a  $C'$  pontban „megtörik”, de minden elemi szakasza továbbra is merőleges lesz az adott elemi szakaszon átmenő fénysugárra. A 4. ábra jobb oldali részén a hullámfront időbeli fejlődése látható. Mivel minden hullámfront két „megtört” szakaszból áll, ezek különböző hosszúságú utakat tesznek meg a megfigyelőig, és így egymással interferálnak. Az ábrán jól látható, hogy a nyílal jelzett irányokban erősítik egymást a frontok. Ezekben az irányokban láthatók a járulékos ívek. Airynek sikerült közelítőleg kiszámítani a megfigyelőhöz érkező fény intenzitásának a szögfüggését [4]. Az Airy-elmélet jól közelíti a mért szögfüggést, és csak kisméretű vízcseppekre ( $R \leq 0,1$  mm), illetve  $\theta \gg \theta_c$  szögekre (a főszivárvány irányától „távol”) nem ad helyes eredményt.

Megleppő módon csak a 20. század elején sikerült kidolgozni a szivárvány értelmezésének egzakt elméletét. A vízcseppre érkező fény elektromágneses síkhullámnak tekinthető. Ez a síkhullám szóródik a vízcseppben. Az  $\mathbf{E}$  elektromos és  $\mathbf{B}$  mágneses tereket a Maxwell-egyenletek írják le. Ezen egyenletek alapján tetszőleges méretű és törésmutatójú gömb alakú anyag fényszórására elsőként 1890-ben *Ludvig V. Lorenz*, majd jóval később, tőle függetlenül, 1908-ban *Gustav Mie*, és egy évvel később henger alakú szórótestekre *Peter J. W. Debye* vezetett le analitikus megoldást (az irodalomban az egzakt elméletet egyszerűen *Mie-elméletnek* nevezik). Numerikus szempontból reménytelennek látszott abban az időben az elmélet jóslatait összevetni a kísérleti eredményekkel. Sokáig feledésbe is merült az elmélet. Csak az utóbbi évtizedekben, a számítógépes lehetőségek javulásával került ismét az érdeklődés középpontjába a Mie-elmélet [4]. Segítségével sikerült értelmezni két másik, közismert légköroptikai jelenséget, a koszorút és a glóriát is [4]. Végül érdemes megjegyezni, hogy a 20. századbeli fizika egyik legfontosabb eredménye, a kvantummechanika alapján több neves fizikus is rámutatott a szivárvány és az atomokon szóródó részecskék kvantummechanikai szórási problémája közti hasonlóságra [4].

Arisztotelész óta több neves fizikus tanulmányozta az egyik legismertebb és legszebb légköri jelenséget, a szivárványt. A szivárvánnyal kapcsolatos jelenségeket egzakt tárgyalása nem nélkülözheti mindazt a tudást, amit a fényről tudunk. Az optika tudományának fejlődésében mindig nagy szerepet játszott az újabb elméletek alkalmazása a szivárvány leírására.

*Cserti József*

Eötvös Egyetem, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

#### Irodalom

1. <http://www.atoptics.co.uk/>  
<http://my.unidata.ucar.edu/content/staff/blynds/rnbw.html>  
[http://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter\\_8.html](http://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html)  
<http://hjem.get2net.dk/Hemmingsen/Rainbow/>  
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/Rainbow/rainbow.html>
2. <http://www.sundog.clara.co.uk/rainbows/supers.htm>
3. MÉSZÁROS E.: *Az arab tudomány öröksége* – História 2006/3 26
4. CSERTI J.: A szivárvány fizikája, az esőcseppek fényszórási jelenségei I–III. – Fizikai Szemle 55 (2005) 297, 349, 422  
<http://www.kfki.hu/fszemle>  
<http://complex.elte.hu/~cserti/Szivarvany.pdf>